

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
UNIDAD LAGUNA
DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS
DEPARTAMENTO DE BIOLOGÍA**



**Caracterización de biosólidos generados en la Planta Potabilizadora de Agua
Saludable y sus posibles aplicaciones**

Por:
Sebastián Armijo Flores

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO EN PROCESOS AMBIENTALES

Torreón, Coahuila, México
Diciembre 2025

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
UNIDAD LAGUNA
DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS
DEPARTAMENTO DE BIOLOGÍA**

Caracterización de biosólidos generados en la Planta Potabilizadora de Agua
Saludable y sus posibles aplicaciones

Por:

Sebastián Armijo Flores

TESIS

Que somete a la consideración del H. Jurado Examinador como requisito parcial
para obtener el título de:

INGENIERO EN PROCESOS AMBIENTALES

Aprobado por:

Dr. Isaías López Hernández
Presidente

Dr. Aldo Iván Ortega Morales
Vocal

Dr. Miguel Medrano Santillana
Vocal

Dra. Natalia Belén Ortega Morales
Vocal suplente

MC. Rafael Ávila Cisneros
Coordinador de la División de Carreras Agronómicas



Torreón, Coahuila, México
Diciembre 2025

*Coordinación de la División
de Carreras Agronómicas*

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
UNIDAD LAGUNA
DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS
DEPARTAMENTO DE BIOLOGÍA**

Caracterización de biosólidos generados en la Planta Potabilizadora de Agua
Saludable y sus posibles aplicaciones

Por:

Sebastián Armijo Flores

TESIS

Presentado como Requisito Parcial para Obtener el Título de:

INGENIERO EN PROCESOS AMBIENTALES

Aprobado por el Comité de Asesoría:

Dr. Isaías López Hernández
Asesor Principal

Dra. Natalia Belén Ortega Morales
Coasesor

Dr. Miguel Medrano Santillana
Coasesor

Dr. Aldo Iván Ortega Morales
Coasesor

MC. Rafael Ávila Cisneros
Coordinador de la División de Carreras Agronómicas



Torreón, Coahuila, México
Diciembre 2025

*Coordinación de la División
de Carreras Agronómicas*

AGRADECIMIENTOS

A mis asesores, el Dr. Isaías López por haberme permitido trabajar con él en este proyecto y formar un gran equipo, por todos sus consejos y apoyo a lo largo de la carrera y por una muy buena amistad; al Dr. José Luis Reyes por compartir sus enriquecedoras experiencias y su conocimiento, así como también su gran apoyo; al Dr. Miguel Medrano por su amabilidad, sus consejos y su apoyo.

A mi Alma Mater, por brindarme la oportunidad de formar parte de la comunidad universitaria, por ser un espacio en el que crecí personalmente y quien vio superar cada desafío que hubo en el camino

A mis maestros, a todos y cada uno de los maestros que me dieron clases, por acompañarme en esta aventura por ser parte de mi crecimiento como estudiante y como persona. Todos y cada uno de ellos quedarán marcados en mi camino

Al personal de la Planta Potabilizadora “Agua Saludable” para La Laguna, por permitirme la visita a la planta y por enseñarme los procesos que ocurren dentro de ella, también, agradecer por las facilidades para la realización de este proyecto.

DEDICATORIAS

A Dios, por darme fuerzas en los momentos complicados y por no dejarme solo, por enviarme personas claves que fueron de gran ayuda, por ser mi fiel acompañante en las noches de incertidumbre y miedo y por darme más de lo que pedí.

A mis padres, Carlos Armijo y Claudia Flores por cada esfuerzo y sacrificio que han hecho a través de los años para darme lo mejor, por ser quienes siempre están detrás de mi impulsándome y alentándome a superarme. Este logro es de todos

A mi hermana, Angélica Armijo por darle alegría y sentido a mi vida por estar presente siempre para mí y por ser lo mejor que me ha pasado.

A mis tías, Guadalupe Flores, Jessica Flores por nunca dejarme solo, por estar presentes en cada etapa de mi vida y por ser mi gran ejemplo a seguir, por quererme y cuidarme, por cada muestra de cariño y de apoyo. A Ulises Flores y Emara Flores, por sus muestras de aprecio a pesar de la distancia, por hacerse presentes sin importar la hora y sin importar que estemos del otro lado del mundo.

A mi abuela, María Salas por ser una abuela cariñosa, por hacerme sentir tan querido y por siempre estar pendiente de mí. Por tantos momentos que hemos compartido juntos y por darme una niñez inolvidable. Te amo Abuela

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS	i
DEDICATORIAS	ii
ÍNDICE GENERAL	iii
LISTA DE CUADROS	iv
LISTA DE FIGURAS	v
RESUMEN.....	vi
ABSTRACT	vii
I. INTRODUCCIÓN	1
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
2.1 Antecedentes	4
2.2 Proceso de purificación de aguas residuales.....	5
2.3 Residuos de lodo	6
2.4 Impacto ambiental	8
2.5 Tratamiento y gestión de los lodos residuales	9
2.6 Alternativas de empleo de lodos residuales.....	10
2.7 Uso eficiente de lodos residuales	11
2.8 Uso en la agricultura	12
2.9 Uso en la construcción	14
III. MATERIALES Y MÉTODOS	16
3.1 Ubicación del proyecto.....	16
3.2 Recolección de muestras.....	18
3.3 Tratamientos evaluados.....	19
3.4 Variables para evaluar	20
3.5 Diseño experimental	21
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	22
V. CONCLUSIONES	28
Referencias	30

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1 Contenido de sólidos totales en muestras del lodo	22
Cuadro 2 Contenido de metales pesados en muestras de lodo	23
Cuadro 3 LMP Especificaciones sanitarias de metales y metaloides	24
Cuadro 4 Contenido de sólidos volátiles en el lodo	25
Cuadro 5 Límites máximos permisibles para metales pesados en biosólidos ..	26
Cuadro 6 Aprovechamiento de biosólidos	27

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Comparativa de sequía en México en los años 2015, 2020 y 2025 (CONAGUA, 2025)	4
Figura 2 Representación del lodo de la planta (Zhou et al., 2024)	7
Figura 3 Esquema del proceso de tratamiento de lodos (Torrado & Pérez, 2022)	9
Figura 4 Usos de lodo de plantas tratadoras en Estados Unidos (Elgarahy et al., 2024)	11
Figura 5 Nutrientes esenciales de los biosólidos en el suelo (Collivignarelli, Canato, Abbà, & Miino, 2019)	12
Figura 6 Biosólidos en el suelo (Minto et al., 2023)	13
Figura 7 Representación del biosólido como material de construcción (Lee et al., 2011)	15
Figura 8 Ubicación de la Planta Potabilizadora Agua Saludable para la Laguna	16
Figura 9 Zona de Residuos y Lodos de la planta potabilizadora	19
Figura 10 Toma de muestras, llenado de frascos	25

RESUMEN

El crecimiento poblacional ha reducido la disponibilidad de agua dulce, por lo que las plantas de tratamiento de aguas residuales se han vuelto una alternativa viable para satisfacer las crecientes demandas sociales, estos procesos de purificación generan a su vez considerables cantidades de lodos residuales. Estos lodos generan impactos sanitarios, ambientales y económicos debido a sus complejos componentes, difíciles de tratar sin dañar el medio ambiente.

El objetivo de esta investigación fue analizar en detalle las características físicas y minerales de los lodos residuales generados por una planta potabilizadora de agua. Al conocer su composición, se buscó evaluar su viabilidad para ser reutilizados de manera segura y eficiente, ya sea como enmienda en suelos agrícolas, mejorando su fertilidad y estructura, o como material alternativo en la industria de la construcción. De esta forma, se buscó no solo reducir el impacto ambiental de su disposición final, sino también promover una gestión más sostenible y circular de los residuos generados en el proceso de potabilización. Se utilizaron métodos estándar para evaluar sus propiedades fisicoquímicas.

Los resultados indicaron la presencia de algunos metales pesados que necesitan ser evaluados para que sea posible una gestión adecuada y no represente un riesgo a la salud y ambiental. Se sugiere establecer protocolos de monitoreo regular del lodo y analizar opciones de tratamiento o disposición segura, especialmente si se considera su reutilización en agricultura, rellenos sanitarios o como insumo en materiales de construcción.

Palabras clave: Residuo, Tratamiento, Lodo residual

ABSTRACT

Population growth has reduced the availability of fresh water, making wastewater treatment plants a viable alternative to meet growing social demands. These purification processes, in turn, generate considerable amounts of sewage sludge. This sludge generates health, environmental, and economic impacts due to its complex components, which are difficult to treat without harming the environment.

The objective of this research was to analyze in detail the physical and mineral characteristics of the sewage sludge generated by a water treatment plant. By understanding its composition, we sought to evaluate its viability for safe and efficient reuse, either as an amendment to agricultural soils, improving their fertility and structure, or as an alternative material in the construction industry. In this way, we sought not only to reduce the environmental impact of its final disposal but also to promote more sustainable and circular management of the waste generated in the water treatment process. Standard methods were used to evaluate physicochemical properties. The results indicated the presence of some heavy metals that need to be evaluated to ensure proper management and prevent them from posing a health or environmental risk. It is suggested that protocols for regular sludge monitoring be established and that treatment or safe disposal options be analyzed, especially if reuse in agriculture, landfills, or as an input in construction materials is considered.

Keywords: Waste, Treatment, Sewage sludge

I. INTRODUCCIÓN

La expansión de la población a nivel mundial ha provocado que los recursos disponibles de agua dulce para uso humano cada vez sean más limitados, teniendo que saciar las demandas y necesidades de un creciente número de habitantes, es por ello que el empleo de plantas de tratamiento de aguas residuales ha resultado una alternativa viable para cubrir las demandas de la sociedad (Wang, Hubacek, Shan, Gerbens-Leenes, & Liu, 2021).

El proceso de purificación de aguas residuales es llevado a cabo en una planta tratadora, ahí se llevan a cabo tres tipos de procesos, el primero consiste en la depuración física de los componentes sólidos, siendo el segundo proceso la eliminación de materiales en suspensión así como compuestos solubles orgánicos, mientras que en el tercer y último proceso se eliminan los compuestos orgánicos que quedaron diluidos y los inorgánicos que resultaron restantes; estos procesos de purificación generan a su vez considerables cantidades de lodos residuales (Poblete, Araujo, & de Medeiros, 2022). Estos residuos de lodo son el producto resultante de las etapas de filtración y sedimentación llevados a cabo en el proceso de la potabilizadora, son obtenidos después de un proceso de filtración, en donde el exceso de agua es eliminado mediante distintas técnicas, mecánicas, de prensa o de centrifugado, de esta manera se obtiene un lodo libre de humedad, manejable y aireado (Zwane et al., 2024).

Estos lodos generan a su vez consecuencias sanitarias, ambientales y económicas ya que poseen diferentes componentes complejos que difícilmente pueden ser tratados adecuadamente sin perjudicar al medio ambiente; generalmente se depositan en basureros o rellenos sanitarios a cielo abierto, se le da un tratamiento hasta su conversión en cenizas o es utilizado en el ámbito agrícola (Manea & Bumbac, 2024; Zwane et al., 2024). Sin embargo el uso eficaz de lodos residuales no es lo suficientemente investigado para determinar un empleo correcto del mismo (Konsulova-Bakalova, Naskova, Malcheva, & Plamenov, 2023). En tiempos actuales, la necesidad de implementar métodos alternativos para el uso eficiente de diversos residuos, se ha vuelto una opción

adecuada para mitigar el daño al medio ambiente, no obstante existen limitaciones económicas, sociales, políticas y geográficas que imposibilitan el aprovechamiento adecuado de dichos residuos (Kizinievič, Žurauskienė, Kizinievič, Yakovlev, & Bur'yanov, 2016).

En la actualidad, reducir el impacto ambiental es un aspecto fundamental que no puede ser tomado a la ligera, las gestión de los residuos en las empresas modernas, deben basarse en el principio de las 5 “R”: Reducir, Reprocesar, Reutilizar, Reciclar y Recuperar, empleando sus materiales de desecho para darles un uso apropiado minimizando la contaminación, disminuyendo el empleo de sustancias superfluas así como buscar otros usos a los desechos generados (Tony, 2022).

Una alternativa que se considerado para los lodos residuales, es en el ámbito de la agricultura, como método de mejoramiento de las propiedades químicas y físicas del suelo agrícola, con efectos favorables, aumentando la propiedad hidráulica del suelo, su textura, resistencia, cambiando las cualidades del agua subterránea, promoviendo un desarrollo y crecimiento eficaz de las plantas, así como también disminuyendo la cantidad de nutrientes necesarios, aumentando la productividad del cultivo y mejorando la captación de agua y aire, favoreciendo un adecuado drenaje incrementando el rendimiento requerido a nivel radicular; todos estos beneficios resultan eficientes dependiendo del tipo de suelo en el que se aplique ya que se recomienda realizar un análisis previamente para conocer las características nutricionales y físicas del suelo (Minto, Gilmour, Jorat, & Tierney, 2023).

Otra posibilidad que se ha evaluado para el uso eficiente de lodos residuales, ha sido el tratamiento para la conversión de materia prima utilizado para la elaboración de ladrillos o cemento utilizado para la construcción, sin embargo, el procedimiento para llevar a cabo esta fabricación de materiales, resulta inasequible para algunos sectores de la población (Lee, Lo, Kuo, & Tsai, 2011).

El objetivo de esta investigación es determinar el contenido físico y mineral de lodos residuales de una potabilizadora de agua y así poder darle un uso adecuado ya sea en el sector agrícola o en la construcción

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Antecedentes

El incremento acelerado de la población, el crecimiento económico, la expansión de la agricultura de regadío y los cambios en los patrones de consumo han hecho que la escasez de agua y la contaminación sean problemas globales graves que amenazan la salud humana, el ecosistema y el desarrollo sostenible de la población; a nivel mundial, dos mil millones de personas viven en países con altos niveles de estrés hídrico, cuatro mil millones enfrentan estrés hídrico severo al menos un mes al año y 1.800 millones de personas sufren de estrés hídrico durante seis meses al año. Se estima que para 2050, más de la mitad de la población mundial residirá en zonas con estrés hídrico (Wang et al., 2021). En México, de acuerdo con el monitor de sequía que mide el grado de estrés de la vegetación, indicadores de sequía, disponibilidad de agua en las presas, entre otros índices, se ha observado un cambio notable para el estado de Coahuila en los últimos 10 años (CONAGUA, 2025).

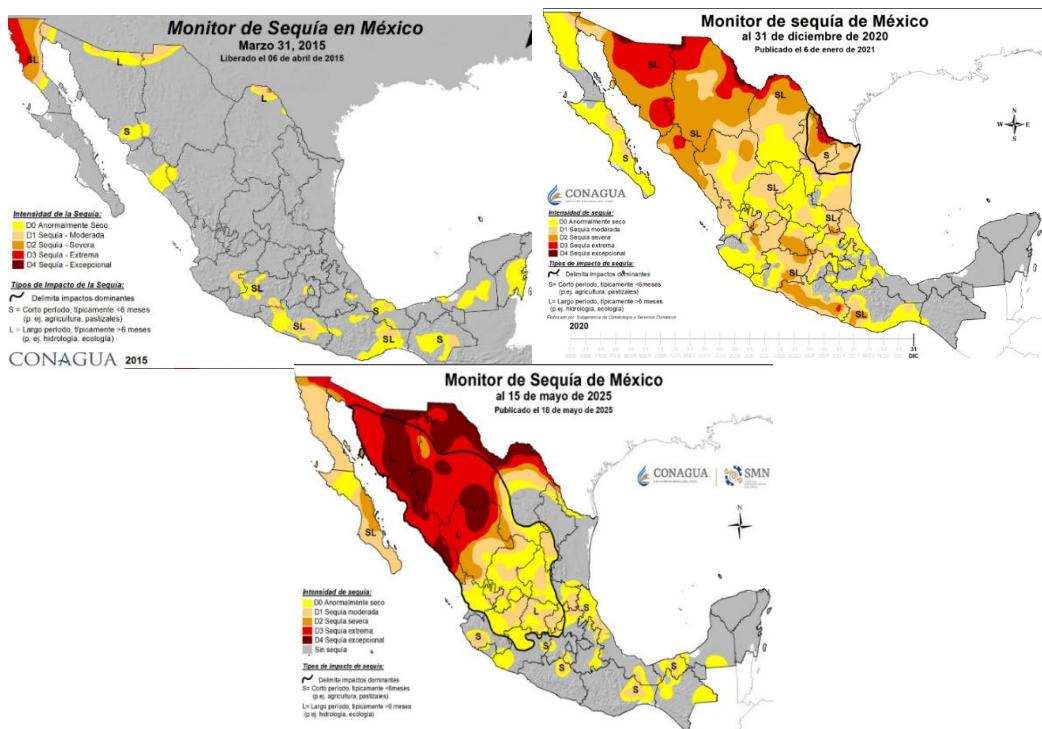


Figura 1 Comparativa de sequía en México en los años 2015, 2020 y 2025 (CONAGUA, 2025)

Combatir el estrés hídrico se ha convertido en una prioridad, es por ello que el tratamiento de aguas residuales ha resultado una alternativa viable para cubrir las demandas de la sociedad (Wang et al., 2021).

El paso del tiempo obliga a la sociedad a la innovación y a la eficiencia a la hora de crear proyectos nuevos para el tratamiento de aguas residuales, lo cual significa una mejora y perfección en las técnicas utilizadas, así como también la creación de equipos que cuenten con las mejores tecnologías mundiales y aumenten la eficiencia del proceso (Konsulova-Bakalova et al., 2023; Poblete et al., 2022).

2.2 Proceso de purificación de aguas residuales

Gran cantidad de empresas tratadoras de agua hacen uso de procesos muy conocidos para el tratamiento del vital líquido, entre estos procesos podemos encontrar un pretratamiento, tratamientos primarios y postratamientos; gran cantidad de procesos que se llevan a cabo para el de tratamiento de agua suelen incluir coagulación, floculación, sedimentación y filtración (Zwane et al., 2024).

Su principal función es eliminar los sólidos del líquido y posteriormente dar origen a la generación de lodos de plantas tratadoras de agua, así mismo estos lodos obtenidos pueden mandarse a un tratamiento extra con la finalidad de eliminar el agua que pueda estar presente en él, lo que trae consigo grandes ventajas, entre ellas el descarte de la presencia de agua y posteriormente un tratamiento más adecuado; después de una serie de tratamientos, tendremos como resultado final la obtención de un biosólido, el cual puede ser utilizado en el sector agrícola, aunque también puede tener como destino final la incineración o pueden ser desechados en vertederos; el buen uso de los biosólidos provenientes de las depuradoras de agua, pueden significar el desarrollo de alianzas entre los agricultores y los operadores de agua, saliendo ambas partes beneficiadas (Cioca, Ciomoş, Seitoar, Druță, & David, 2021; Zwane et al., 2024).

Con el paso del tiempo, las instalaciones llegan a alcanzar su capacidad máxima y es cuando se presentan desafíos grandes para la gestión de los lodos de las

depuradoras; se trata de buscar soluciones y alternativas sustentables, creativas y rentables (Mulopo, 2024).

2.3 Residuos de lodo

Los biosólidos son el principal residuo del proceso de tratamiento de agua, son tratados para eliminar los posibles riesgos a la salud y al medio ambiente. Al ser tratado se le dan características para un uso beneficioso.(S. Marchuk et al., 2023)

Los lodos residuales, también conocidos como biosólidos es el resultado de distintos procesos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales, podría conocerse también como materia orgánica seca (Vaithyanathan & Cabana, 2021).

Los biosólidos son un residuo importante del proceso de tratamiento de las aguas residuales ya que tienen presente gran contenido de nutrientes(Mohajerani, Ukwatta, & Setunge, 2018).

La obtención de los biosólidos está incrementando de forma considerable debido a la gran presencia de plantas de tratamiento de aguas residuales(H. Wang et al., 2008)

Las técnicas más utilizadas para la deshidratación de los lodos son la deshidratación mecánica, uso de centrifugados y de filtros prensa (Zwane et al., 2024).

El lodo está constituido principalmente de biomasa y algunas células microbianas, la biomasa está conformada por alrededor de 40% se carbohidratos, 30% de proteínas y el otro 30% de lípidos; también pueden incluirse en la composición de los biosólidos residuos orgánicos, así como también existe la presencia de metales pesados como Zn,Cr,Pb,y Ni, además de algunos agentes contaminantes que pueden ser peligrosos tales como insecticidas, productos de origen farmacéutico y productos de cuidado personal (Elgarahy et al., 2024; Manea & Bumbac, 2024).

La obtención de estos lodos es algo que no podemos evitar, aproximadamente, la cantidad de lodos es proporcional al tamaño de la población, por lo que es un crecimiento exponencial (Serhiy Marchuk et al., 2023).

La adecuada gestión de lodos municipales involucra distintos sectores, juega un papel importante la parte ambiental, la parte sanitaria y la económica; los lodos originados en las depuradoras municipales son producto de los procesos de tratamiento de aguas, son un material difícil de manejar y tiene características que lo hacen contaminante y que son difíciles de eliminar y pueden generar daños en el medio ambiente; desechar el lodo en vertedero es una práctica que se realiza con mucha frecuencia, pero con el paso del tiempo es menos utilizada pues ocupa mucho volumen y puede llegar a contaminar el agua subterránea (Manea & Bumbac, 2024; Zhou et al., 2024).

En el mundo, el reciclaje y el uso de algunos residuos, así como la obtención de materias primas secundarias se ha ido intensificando (Kizinievič et al., 2016).



Figura 2 Representación del lodo de la planta (Zhou et al., 2024)

2.4 Impacto ambiental

El manejo de los lodos provenientes de plantas depuradoras de una forma ambiental, económica y socialmente aceptable es uno de los retos que enfrentamos como sociedad; sumado a esto, también se tiene la problemática de poder cumplir con toda la normativa existente y con todos los parámetros y requisitos de calidad que son muy estrictos, los cuales obligan a tener mayores tratamientos para poder así enviar los lodos desde la planta hasta su destino final o una posible reutilización (Canziani & Spinosa, 2019).

La presencia de compuestos tóxicos en altas concentraciones y el gran volumen que representa la gestión de lodos trae consigo preocupaciones medioambientales (Arvaniti et al., 2024).

La gestión de estos residuos ricos en materia orgánica mediante técnicas de recuperación amables con el medio ambiente representa un gran reto para la sociedad (Vaithyanathan & Cabana, 2021).

La gestión de lodos toma un papel muy importante sobre todo en el desarrollo y creación de técnicas especializadas para reducir la producción masiva de lodos, así como también su impacto ambiental; por esto mismo se opta por reutilizar este biosólido en vez de una simple eliminación, ya que gracias a su contenido se le puede agregar valor material y energético (Canziani & Spinosa, 2019).

Los biosólidos como principal materia prima es una opción muy buena, la creación de productos con los lodos es un plan de desarrollo sostenible a largo plazo para la gestión de los lodos; esta alternativa implica innovar hacia productos ecológicos y sostenibles derivados del biosólido generado y se abordan problemas ocasionados por los residuos de la depuradora (Mulopo, 2024).

Tener conocimiento sobre cómo se comportan los microplásticos en las plantas tratadoras de agua residuales y como un buen tratamiento nos ayudara a reducir la presencia de microplásticos en el producto final, que vendría siendo el biosólido, en este caso la deshidratación es un proceso indispensable en el

tratamiento de lodos (Harley-Nyang, Memon, Jones, & Galloway, 2022; Hooge et al., 2023; Prus & Wilk, 2024).

2.5 Tratamiento y gestión de los lodos residuales

Con el paso del tiempo se generan mayores cantidades de aguas residuales alrededor del mundo. Gran porcentaje de estas aguas son sometidas a tratamientos biológicos con la intención de eliminar el carbono disuelto, los sólidos, los patógenos y otros tipos de contaminantes presentes en el agua. Una vez que el agua haya sido tratada se vierte a cuerpos de aguas superficiales. Este tipo de procesos a su vez generan grandes cantidades de biosólidos. Un efluente tratado suele ir de la mano con una mayor obtención de biosólidos (H. L. Wang et al., 2008)

Una buena gestión de los lodos generados del proceso de tratamiento de las aguas residuales empieza con la caracterización de los residuos, en esta fase se identificará, y analizará las propiedades fisicoquímicas y microbiológicas de los lodos, después de esto, el lodo pasa por distintas etapas de procesamiento con la finalidad de reducir la humedad presente, minimizar los contaminantes y darle valor a los componentes que contiene el lodo que puedan ser útiles como los nutrientes y la materia orgánica (Torrado & Pérez, 2022).

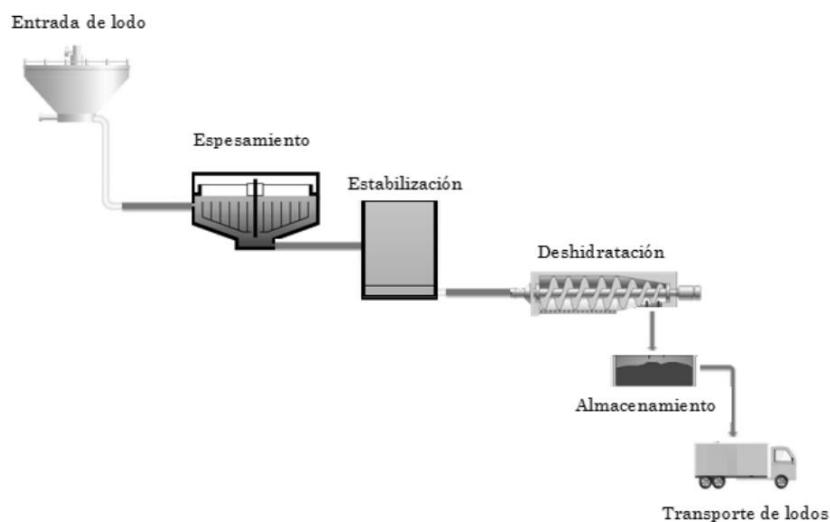


Figura 3 Esquema del proceso de tratamiento de lodos (Torrado & Pérez, 2022)

Identificar los componentes del lodo es fundamental en el manejo y gestión de los lodos pues nos permite identificar y analizar las propiedades físicas, biológicas y químicas de los lodos (Canziani & Spinoza, 2019).

Los biosólidos deben ser tratados de manera correcta, hasta alcanzar una buena calidad y así poder minimizar o eliminar todo tipo de potencial riesgo para el medio ambiente y la salud pública; también, el tratamiento servirá para caracterizarlo y poder darle un uso beneficioso (Serhiy Marchuk et al., 2023).

El tratamiento y gestión de los lodos ha presentado un gran desafío sin embargo ha incrementado el interés en tratarlo y reutilizarlo; esto se debe a un cambio hacia un modelo de economía circular y a su elevado precio al momento de eliminarlo (Elgarahy et al., 2024; Minto et al., 2023).

En la actualidad los sistemas de depuración de lodos al igual que su manejo adecuado no se ha estudiado suficiente (Konsulova-Bakalova et al., 2023).

2.6 Alternativas de empleo de lodos residuales

Desde la década de 1890 se tienen registros del empleo de biosólidos en campos agrícolas de Europa y Norteamérica, con el paso de los años se han diseñado medidas y métodos para garantizar la seguridad humana y ambiental (Mohapatra, Cledón, Brar, & Surampalli, 2016)

Es de suma importancia examinar y evaluar de manera muy detallada las posibles ventajas y beneficios que puede tener la aplicación de biosólidos en el suelo y saber que como actuar ante posibles desventajas (Elgarahy et al., 2024; Qrenawi & Rabah, 2021).

La utilización de biosólidos para la generación de energía es una estrategia de gestión viable (Egan, 2013)

En el sector agrícola y de la mano con la economía circular, los biosólidos han tenido intervenciones positivas ya sea en aplicaciones agrícolas o como materia prima para la producción de materiales para la construcción (Popoola, Olawale, & Salami, 2023)

Gracias a la baja densidad de los lodos de procesos de purificación de agua y a su conductividad térmica, estos biosólidos tienen las características de poder ser productos estructurales y de buen aislante térmico (Kizinievič et al., 2016)

2.7 Uso eficiente de lodos residuales

Los lodos provenientes de plantas tratadoras de agua pueden traer consigo diferentes sustancias que podrían afectar severamente al medio ambiente; entre estas sustancias se encuentran presentes oligoelementos que tienen potencial para causar peligro, ya sea que se propague por medio de la cadena alimentaria o como contaminante en el agua subterránea y superficial (Elgarahy et al., 2024).

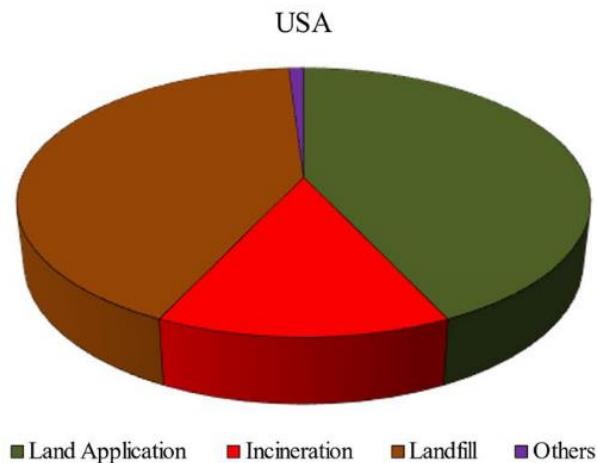


Figura 4 Usos de lodo de plantas tratadoras en Estados Unidos (Elgarahy et al., 2024)

2.8 Uso en la agricultura

El uso correcto y eficaz de los lodos en suelo agrícola requiere un previo estudio de sus efectos sobre las características físicas del suelo como por ejemplo la cohesión, la resistencia y la agregación, requiere un estudio sobre crecimiento vegetal y la calidad del agua subterránea (Minto et al., 2023; Shukla, Khan, Chrzanowski, Vagliasindi, & Roccaro, 2025).

Dependiendo de ciertos factores bióticos y abióticos, los biosólidos pueden llegar a tener efectos positivos sobre la vegetación, al aplicarse en el suelo actúa de manera benéfica sobre las limitantes hídricas y nutricionales a corto plazo, mejorando el crecimiento de las plantas introducidas (Rodas Purizaga et al., 2023).

La aplicación de biosólidos en el suelo pueden utilizarse como fertilizantes para fines agrícolas (Gabriel Steven, Vilalai, Peot, & Ramirez, 2006)

La aplicación de biosólidos en el suelo trae consigo ciertos beneficios, entre ellos un aumento en la productividad del sitio pues hay un aumento considerable en el contenido de materia orgánica, también ayuda en la fertilidad ((Koukoulakis, Kanatas, Kyritsis, Ntzala, & Kalavrouziotis, 2023). Los biosólidos contienen altas concentraciones de nutrientes que ayudan al crecimiento de las plantas y favorece al suelo y sus propiedades (Al-Gheethi et al., 2018).

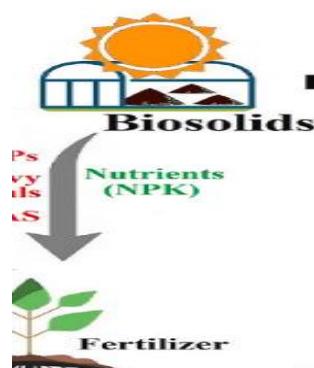


Figura 5 Nutrientes esenciales de los biosólidos en el suelo (Collivignarelli, Canato, Abbà, & Miino, 2019)

Los lodos provenientes de las plantas de tratamiento de aguas residuales pueden aplicarse a los suelos para mejorar sus características, para mejorar su fertilidad y promover la economía circular entre ambas partes, el tratamiento de aguas residuales y la agricultura (Anyame Bawa, Chan, Wrobel-Tobiszewska, Hardie, & Towns, 2024)

El uso de biosólidos en el sector agrícola tiene muchas ventajas y un potencial muy significativo debido a las grandes cantidades que se generan y a los nutrientes presentes en el lodo, así como también gran contenido de carbono y principalmente a precios sumamente bajos (Serhiy Marchuk et al., 2023; Milojevic & Cydzik-Kwiatkowska, 2021).

La adición de lodos también nos brinda mayor estructura lo que conlleva a una mejor infiltración del agua que a su vez nos da un mejor drenaje (Charbonneau et al., 2024; Minto et al., 2023).

La adición de biosólidos como fertilizante puede reducir la incorporación de algún fertilizante de origen artificial para que así la planta cumpla sus requerimientos nutrimentales (Garcés-Hernández et al., 2024).

El uso adecuado de los biosólidos en la tierra es una de las opciones más viables para recuperar al máximo los nutrientes críticos para las plantas, entre ellos el N, P y K (Hedayati Marzbali et al., 2024)

En algunos cultivos, el añadir materia orgánica trae consigo diferentes beneficios, ofrece un mayor rendimiento en el cultivo y disminuye la cantidad de nutrientes requeridos (Minto et al., 2023).

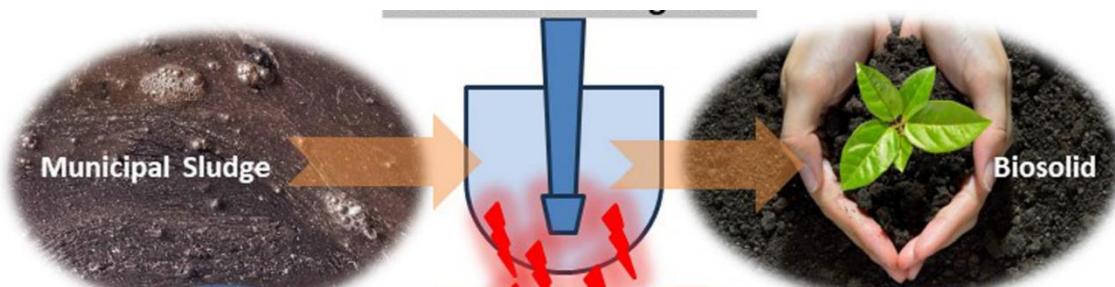


Figura 6 Biosólidos en el suelo (Minto et al., 2023)

2.9 Uso en la construcción

Los ladrillos han sido el material primario en la industria de la construcción durante un largo periodo de tiempo, esto debido a sus características favorables para la industria, los ladrillos convencionales suelen ser resistentes, durables y son fiables, sin embargo el proceso para la obtención de los ladrillos implica la cocción que a su vez se relaciona con la liberación de varias emisiones de gases a la atmósfera lo que genera un peligro al medio ambiente y tiene un impacto significativo en la contaminación ambiental (Aruna Ukwatta, Mohajerani, Setunge, & Eshtiaghi, 2018).

Por eso, se promueven nuevas formas de fabricar ladrillos de arcilla cocida que reduzcan el uso de materiales vírgenes, con el objetivo de cuidar los recursos naturales y avanzar hacia un desarrollo más sostenible (A. Ukwatta & Mohajerani, 2017).

En los últimos años, el uso de materiales de desecho ha sido una alternativa prometedora y viable en la industria de la construcción para la elaboración de ladrillos (A. Ukwatta, Mohajerani, Eshtiaghi, & Setunge, 2016).

Estas nuevas alternativas se han convertido en una solución viable en la que todos ganan, pues permite transformar residuos los cuales antes generaban un problema en materiales de mucha utilidad y de un gran valor. De esta manera no solo se le da un nuevo fin al residuo, sino que se minimiza el impacto ambiental que los residuos generarían. Usar los biosólidos provenientes de las plantas de tratamiento de agua residual en la fabricación de ladrillos es una manera inteligente y responsable para alivianar la carga a los recursos naturales, pues se verán beneficiados al momento de disminuir la extracción de materiales vírgenes. Incorporar biosólidos en la industria de la construcción no solo representa una opción posible sino que es una oportunidad prometedora para la innovación, el reciclaje y la construcción de una manera más consciente (A. Ukwatta & Mohajerani, 2017).

La adición de residuos en los ladrillos está tomando mucha fuerza en la industria desde el contexto de la producción de materiales de construcción sostenibles (Mohajerani et al., 2018).

Hay estudios que analizan la posibilidad de utilizar lodos provenientes de plantas purificadoras de agua como principal componente para la fabricación de cemento o ladrillos (Lee et al., 2011).



Figura 7 Representación del biosólido como material de construcción (Lee et al., 2011)

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Ubicación del proyecto

El presente estudio se llevó a cabo de enero a noviembre del 2024, en dos ubicaciones principales: la Planta Potabilizadora “Agua Saludable” para La Laguna, situada en el Ejido San Jacinto del municipio de Lerdo, Durango, y el laboratorio de suelos de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Unidad Laguna, ubicada en las coordenadas $25^{\circ} 33'28''$ N Y $103^{\circ} 22' 06''$ W en Torreón, Coahuila.

La Planta Potabilizadora "Agua Saludable para La Laguna", tiene el objetivo de suministrar agua potable de calidad a la Comarca Lagunera. La planta se localiza cerca del cerro de San Jacinto, a aproximadamente 32 kilómetros de la cabecera municipal de Lerdo, y cuenta con una capacidad para potabilizar 6.34 metros cúbicos por segundo mediante 10 módulos de tratamiento. Las coordenadas geográficas de la planta son $25^{\circ}27'33.12''$ de latitud norte y $103^{\circ}43'16.53''$ de longitud oeste.



Figura 8 Ubicación de la Planta Potabilizadora Agua Saludable para la Laguna

Las muestras de lodo residual utilizadas en este estudio fueron recolectadas directamente de esta planta potabilizadora, aprovechando su relevancia en el tratamiento de agua para la región. El área está dividida en diferentes zonas funcionales, cada una con un propósito específico dentro del ciclo de potabilización (CONAGUA, 2024).

Zona de Captación

- **Función:** Extrae agua cruda desde fuentes superficiales o subterráneas (ríos, presas o pozos).
- **Infraestructura:** Estaciones de bombeo, rejillas de protección y desarenadores.
- **Características:** Incluye medidas de control de sólidos grandes y sedimentos para evitar daños a los equipos.

Zona de Pretratamiento

- **Función:** Remueve partículas grandes, arena y materia orgánica gruesa.
- **Procesos:**
 - Coagulación y floculación con productos químicos amigables con el medio ambiente.
 - Sedimentación para separación de sólidos.

Zona de Tratamiento

- **Función:** Elimina contaminantes microbiológicos, químicos y físicos.
- **Procesos clave:**
 - Filtración (por arena, carbón activado o membranas).
 - Desinfección con cloro, ozono o luz ultravioleta (UV).
- **Innovación:** Utiliza tecnologías de bajo consumo energético y alta eficiencia.

Zona de Almacenamiento

- **Función:** Almacena el agua potabilizada antes de su distribución.
- **Componentes:** Tanques cerrados para evitar recontaminación, sistemas de control automatizados.

Zona de Control y Laboratorio

- **Función:** Supervisión de parámetros de calidad del agua.
- **Equipamiento:** Laboratorios de análisis fisicoquímico y microbiológico, sala de control SCADA para monitoreo en tiempo real.

Zona de Residuos y Lodos

- **Función:** Manejo de subproductos del tratamiento.
- **Tratamiento:** Espesamiento, deshidratación y disposición final segura o uso agrícola del lodo estabilizado.

3.2 Recolección de muestras

Para el presente proyecto se trabajó en la zona de residuos y lodos, se recolectaron muestras de lodo generado por el espesador, de consistencia líquida, de color café, se recolectó en frascos ámbar con capacidad de un litro, así mismo también se colectaron en envases de HDPE (polietileno de alta densidad) teniendo en total 12 muestras siendo seis y seis respectivamente. Las muestras fueron recolectadas utilizando guantes de látex desechables y con la ayuda de cucharas para muestreo fabricadas en poliestireno blanco estéril de un solo uso para evitar la contaminación del material de muestra. Recolectando aproximadamente 540 m³.



Figura 9 Zona de Residuos y Lodos de la planta potabilizadora

Las muestras fueron almacenadas y transportadas bajo condiciones controladas hasta el laboratorio para su análisis. Manteniéndolas en un lugar libre de los rayos del sol, a temperatura $\leq 4^{\circ}\text{C}$, en un ambiente seco, ventilado y libre de contaminantes externos.

En la fase de laboratorio, se acondicionaron las áreas de trabajo en la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, realizando limpieza, organización de materiales y calibración de instrumentos. Posteriormente, se procedió a la realización de las pruebas fisicoquímicas y metalúrgicas correspondientes, siguiendo procedimientos técnicos estandarizados.

3.3 Tratamientos evaluados

Para caracterizar adecuadamente los biosólidos, se aplicaron diversos tratamientos analíticos a las muestras recolectadas. Se emplearon técnicas estándar para la evaluación de sus propiedades fisicoquímicas, entre ellas:

- **Determinación de humedad:** realizada mediante secado en estufa a 105°C hasta alcanzar peso constante, de acuerdo con la norma ISO 5068-1. Esta prueba permite conocer el contenido de agua en el biosólido, un dato crucial para su manejo y disposición.
- **Contenido de sólidos totales y volátiles:** medido utilizando métodos gravimétricos, mediante calcinación a 550°C en mufla. Estos análisis

permiten establecer la proporción de materia orgánica presente en el material.

- **Detección de metales pesados:** se llevó a cabo mediante digestión ácida de las muestras, seguida de lectura con espectrofotometría de absorción atómica. Se evaluaron elementos como plomo (Pb), cadmio (Cd), cobre (Cu), níquel (Ni), zinc (Zn), cromo (Cr) y mercurio (Hg), siguiendo las recomendaciones de la Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002, que establece los límites máximos permisibles de metales pesados en lodos tratados para su uso como mejorador de suelos.

Estos tratamientos permitieron obtener una visión integral de la composición del lodo, con el fin de determinar su viabilidad para posibles usos agrícolas o su necesidad de tratamiento adicional antes de su disposición (Sadzawka et al., 2015).

3.4 Variables para evaluar

Las variables seleccionadas para este estudio fueron definidas con base en su relevancia para la caracterización y potencial aprovechamiento del biosólido. Las principales variables analizadas fueron:

- **Humedad (%):** porcentaje de agua presente en la muestra, relevante para conocer su estabilidad, peso y costos de transporte.
- **Sólidos totales (%):** cantidad de materia sólida contenida en el biosólido, incluyendo tanto materia orgánica como inorgánica.
- **Sólidos volátiles (%):** proporción de materia orgánica susceptible a combustión, indicador del grado de estabilización del material.
- **Presencia y concentración de metales pesados (mg/kg):** se evaluaron varios elementos tóxicos potenciales, lo cual es crítico para determinar si el biosólido cumple con los estándares de seguridad para su uso en suelos agrícolas o si representa un riesgo ambiental o para la salud.

3.5 Diseño experimental

El diseño experimental empleado fue un modelo completamente aleatorizado con tres repeticiones por tratamiento, lo cual permitió minimizar la influencia del error experimental y aumentar la confiabilidad de los resultados. Cada unidad experimental consistió en una muestra representativa de lodo recolectada en condiciones homogéneas. Los análisis se realizaron por triplicado para cada variable, garantizando así la consistencia de los datos obtenidos.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las muestras recolectadas fueron enviadas para su análisis al laboratorio “Grupo microanálisis” S.A. de C.V. ubicado en Sostenes Rocha No. 28 Col. Magdalena Mixchuca, Venustiano Carranza, Ciudad de México C.P 15850.

Las muestras de lodo presentaron una temperatura ambiente de 18 °C, una humedad relativa de 34 %, una presión barométrica de 765 mm Hg y sus especificaciones de contenido se muestran a continuación:

Cuadro 1 Contenido de sólidos totales en muestras del lodo

Parámetro	Unidad	Resultado
Piridina	mg/L	<0.001
o-Cresol	mg/L	<0.001
m, p-Cresol	mg/L	<0.002
Hexacloroetano	mg/L	<0.001
Nitrobenceno	mg/L	<0.001
Hexacloro-1,3-butadieno	mg/L	<0.001
2,4,6-Triclorofenol	mg/L	<0.001
2,4,5-Triclorofenol	mg/L	<0.001
2,4-Dinitrotolueno	mg/L	<0.001
Hexaclorobenceno	mg/L	<0.001
Pentaclorofenol	mg/L	<0.001
Lindano	mg/L	<0.001
Heptacloro	mg/L	<0.001
Clordano	mg/L	<0.001
Heptacloro epoxido	mg/L	<0.001
Endrin	mg/L	<0.001
Toxafeno	mg/L	<0.001
Metoxicloro	mg/L	<0.001

Ninguno de los compuestos listados fue detectado en la muestra analizada garantizando que las muestras de lodo no contienen residuos peligrosos.

Cuadro 2 Contenido de metales pesados en muestras de lodo

Parámetro	Unidad	Resultado
Arsénico	mg/L	0.006*
Plata	mg/L	0.121 ±
Plata	mg/L	0.010
Bario	mg/L	0.004
Cadmio	mg/L	<0.004
Cromo	mg/L	<0.004
Plomo	mg/L	0.020*
Selenio	mg/L	0.015

Al igual que en el cuadro anterior, todos los valores se encuentran dentro del rango permitido, sin embargo, en el caso del plomo de acuerdo con la NOM- 127 SSA1-2021 se encuentra muy elevado la presencia de este metal en las muestras. Y aunque el arsénico se encuentra dentro del rango permitido dentro de la mencionada norma (límite: 0.025) se debe seguir monitoreando de manera continua para conocer sus niveles.

La presencia del plomo representa una amenaza directa si se encuentra confinado en el lodo, sugiere acumulación significativa que podría convertirse en un riesgo ambiental si el manejo del lodo no es adecuado. El plomo es un metal persistente y bioacumulativo, con efectos neurotóxicos bien documentados.

La detección de trazas de arsénico y plata en el lodo también debe considerarse cuidadosamente. El arsénico es un contaminante prioritario por sus propiedades cancerígenas, aunque en este caso se encuentra en concentraciones relativamente bajas. La presencia de metales en el lodo puede estar relacionada con el tipo de agua cruda tratada, las condiciones del proceso de potabilización (pH, coagulantes, etc.), y posibles fuentes antropogénicas o naturales.

Cuadro 3 LMP Especificaciones sanitarias de metales y metaloides

Parámetros	Límite permisible (mg/L)
Aluminio	0.2
Arsénico	0.025
Bario	1.3
Cadmio	0.005
Cobre	2
Cromo total	0.05
Hierro	0.3
Manganoso	0.15
Mercurio	0.006
Níquel	0.07
Pbomo	0.01
Selenio	0.04

Los resultados muestran que ninguno de los compuestos analizados fue detectado por encima del límite mínimo de cuantificación (<0.002 mg/L), lo cual es una señal positiva sobre la eficiencia del proceso de tratamiento en cuanto a este tipo de contaminantes.

Estos hallazgos son importantes porque el lodo residual de plantas potabilizadoras se considera un subproducto que puede ser reutilizado o dispuesto en sitios controlados, por lo que su composición debe ser monitoreada. La acumulación de metales pesados representa un riesgo si el lodo es usado, por ejemplo, como ayuda para el sector agrícola, en forma de abono o fertilizante de la misma manera tampoco puede ser desechado sin tratamiento adecuado. Es necesario tener en cuenta la movilidad y biodisponibilidad de cualquier metal específico antes de ser aplicado para uso agrícola, ya que dependerá de la rizosfera y las características del suelo en el que se emplee (Merdy, Cherfouh, & Lucas, 2024)

Cuadro 4 Contenido de sólidos volátiles en el lodo

Parámetro	Unidad	Resultado
Cloruro de vinilo	mg/L	<0.002
1,1-Dicloroetileno	mg/L	<0.002
2-Butanona	mg/L	<0.002
Cloroformo	mg/L	<0.002
Tetracloruro de carbono	mg/L	<0.002
Benceno	mg/L	<0.002
1,2-Dicloroetano	mg/L	<0.002
Tricloroetileno	mg/L	<0.002
Tetracloroetileno	mg/L	<0.002
Clorobenceno	mg/L	<0.002
1,4-Diclorobenceno	mg/L	<0.002

**Figura 10** Toma de muestras, llenado de frascos

Consideraciones de los biosólidos de acuerdo con lo establecido en la NOM-04-SEMARNAT-2002 lodos y biosolidos. Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final.

Revisando los resultados de los muestreos en comparación con los límites máximos permisibles de esta norma de acuerdo con el cuadro 5 podemos concluir que en cuanto a metales pesados los biosolidos de la planta potabilizadora se encuentran por debajo de los valores indicados por lo que son de categoría excelente. Como se ve a continuación.

Cuadro 5 Límites máximos permisibles para metales pesados en biosolidos

Contaminante	Excelentes (mg/kg)	Buenos (mg/kg)
Arsénico	41	75
Cadmio	39	85
Cromo	1 200	3 000
Cobre	1 500	4 300
Plomo	300	840
Mercurio	17	57
Níquel	420	420
Zinc	2 800	7 500

Como podemos ver el aprovechamiento de los biosólidos, se establece en función del tipo y clase, como se especifica en el cuadro 6 y su contenido de humedad no sobrepase el 85%. Como se ve a continuación en la tabla y donde podemos identificar que los lodos pueden ser usados las áreas verdes de la planta potabilizadora.

Cuadro 6 Aprovechamiento de biosolidos

Tipo	Clase	Aprovechamiento
Excelente	A	Usos urbanos con contacto público directo durante su aplicación Los establecidos para clase B y C
Excelente o bueno	B	Usos urbanos sin contacto público directo durante su aplicación Los establecidos para clase C
Excelente o bueno	C	Usos forestales Mejoramientos de suelos Usos agrícolas

V. CONCLUSIONES

Los resultados del presente estudio evidencian que los lodos generados en la planta potabilizadora contienen concentraciones detectables de plomo, por lo que requieren atención en el manejo y disposición final de estos residuos. Aunque los compuestos orgánicos volátiles no fueron detectados, lo cual es positivo, la presencia del metal pesado (plomo) en el lodo podría representar un riesgo ambiental y de salud si no se gestionan correctamente.

Se recomienda implementar protocolos de monitoreo periódico del lodo, así como evaluar alternativas de tratamiento o confinamiento seguro, especialmente si se contempla la reutilización de este en actividades agrícolas, rellenos sanitarios o su disposición para materiales de construcción.

Sin embargo, de acuerdo con lo estipulado en la NOM-004-SEMARNAT-2002 estos lodos son clasificados como residuos de manejo especial descritos en el párrafo anterior, por su propia naturaleza, no presentan características de corrosividad, reactividad, explosividad, inflamabilidad, y no son de origen biológico infeccioso, por lo que solo presentan las de toxicidad derivada de algunos de los componentes internos de los equipos y partes internas que lo forman.

Por tal motivo, dichos residuos pueden representar riesgos a cuerpos de agua, limitándose a causar daños solo cuando son depositados indebidamente en rellenos sanitarios o bien en contacto continuado con suelos, ya que se trata de residuos sólidos de manejo especial, por los que pueden ser aplicados como mejorador de suelo para las áreas verdes ubicadas en la planta potabilizadora de acuerdo con el siguiente procedimiento.

PROCEDIMIENTO PARA LA APLICACIÓN DEL BIOSOLIDO.

De acuerdo con las condiciones del terreno, se recomienda que los biosolidos se ubiquen en un lugar despejado totalmente expuesto al sol, aislado de posibles agentes contaminantes, lejos de una fuente de agua y preferiblemente ubicado a la dirección de los vientos dominantes.

Para la incorporación de los biosólidos en la superficie arbolada de la planta potabilizadora se sugiere colocar 140 toneladas de este por hectárea ya que la superficie arbolada de la potabilizadora es de aproximadamente es de 70 hectáreas. La manera de incorporación fue colocando montículos de biosólido que posteriormente pueden ser esparcidos por medio de tractores.

Sugerencia de construcción del área de secado de biosólidos

Se propone la construcción de un área de disposición de los biosólidos a un costado del tren 10 de potabilización, ya que es donde se encuentra la mayor área disponible, ya que para el área de secado se requiere de un área de 5,000 m² aproximadamente, con una excavación de 4 mts de profundidad y la colocación de una geomembrana para la contención de los posibles lixiviados.

Posteriormente se irán colocando más de 10,000 toneladas lodos extraídos de los lechos de secado de los 10 módulos de potabilización, hasta la formación de un montículo de 1 metro de altura. Una vez que este lodo tenga un contenido de humedad por abajo del 20 % podrá ser utilizado como mejorador de suelo para las áreas verdes, ya que contiene un 10 % de materia orgánica.

Referencias

- Al-Gheethi, A. A., Efaq, A. N., Bala, J. D., Norli, I., Abdel-Monem, M. O., & Ab Kadir, M. O. (2018). Removal of pathogenic bacteria from sewage-treated effluent and biosolids for agricultural purposes. *Applied Water Science*, 8(2). doi:10.1007/s13201-018-0698-6
- Anyame Bawa, S., Chan, A., Wrobel-Tobiszewska, A., Hardie, M., & Towns, C. (2024). A review of methods for mitigating microplastic contamination in biosolids from wastewater treatment plants before agricultural soil application. *Science of the Total Environment*, 957, 177360. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.177360>
- Arvaniti, O. S., Fountoulakis, M. S., Gatidou, G., Kalantzi, O. I., Vakalis, S., & Stasinakis, A. S. (2024). Perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances in sewage sludge: Challenges of biological and thermal treatment processes and potential threats to the environment from land disposal. *Environmental Sciences Europe*, 36(1), 16. doi:10.1186/s12302-024-01031-3
- Canziani, R., & Spinosa, L. (2019). Sludge from wastewater treatment plants. In M. N. V. Prasad, P. J. de Campos Fava, M. Vithanage, & S. V. Mohan (Eds.), *Industrial and Municipal Sludge* (pp. 3-30): Butterworth-Heinemann.
- Charbonneau, A., Lucotte, M., Moingt, M., Blakney, A. J. C., Morvan, S., Bipfubusa, M., & Pitre, F. E. (2024). Fertilisation of agricultural soils with municipal biosolids: Glyphosate and aminomethylphosphonic acid inputs to Quebec field crop soils. *Science of the Total Environment*, 922, 10. doi:10.1016/j.scitotenv.2024.171290
- Cioca, L.-I., Ciomoş, A.-O., Ţeitoar, D., Druţă, R. M., & David, G. M. (2021). Industrial symbiosis through the use of biosolids as fertilizer in romanian agriculture. *Recycling*, 6(3). doi:10.3390/recycling6030059
- Collivignarelli, M. C., Canato, M., Abbà, A., & Miino, M. C. (2019). Biosolids: What are the different types of reuse? *Journal of Cleaner Production*, 238. doi:10.1016/j.jclepro.2019.117844
- CONAGUA. (2024). Agua Saludable para La Laguna beneficiará a 9 municipios de Coahuila y Durango. Retrieved from <https://www.gob.mx/conagua/prensa/con-mas-de-80-de-avance-agua-saludable-para-la-laguna-beneficiara-a-9-municipios-de-coahuila-y-durango>
- CONAGUA. (2025). Monitor de sequía. Retrieved from <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/monitor-de-sequia/monitor-de-sequia-en-mexico>
- Egan, M. (2013). Biosolids management strategies: an evaluation of energy production as an alternative to land application. *Environmental Science and Pollution Research*, 20(7), 4299-4310. doi:10.1007/s11356-013-1621-1
- Elgarahy, A. M., Elofty, M. G., Priya, A. K., Yogeshwaran, V., Yang, Z., Elwakeel, K. Z., & Lopez-Maldonado, E. A. (2024). Biosolids management and

- utilizations: A review. *Journal of Cleaner Production*, 451, 141974.
 doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141974>
- Gabriel Steven, A., Vilalai, S., Peot, C., & Ramirez, M. (2006). Statistical Modeling to Forecast Odor Levels of Biosolids Applied to Reuse Sites. *Journal of Environmental Engineering*, 132(5), 479-488.
 doi:10.1061/(ASCE)0733-9372(2006)132:5(479)
- Garcés-Hernández, C., Robinson, B., Bravo-Linares, C., Lowe, H., Villanueva, S., Prosser, J., & Gutiérrez-Ginés, M.-J. (2024). An assessment of the suitability of contrasting biosolids for raising indigenous plants in nurseries. *Water* (20734441), 16(9), 1226. doi:10.3390/w16091226
- Harley-Nyang, D., Memon, F. A., Jones, N., & Galloway, T. (2022). Investigation and analysis of microplastics in sewage sludge and biosolids: A case study from one wastewater treatment works in the UK. *Science of the Total Environment*, 823, 153735.
 doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153735>
- Hedayati Marzbali, M., Hakeem, I. G., Ngo, T., Balu, R., Jena, M. K., Vuppaldadiyam, A., . . . Shah, K. (2024). A critical review on emerging industrial applications of chars from thermal treatment of biosolids. *Journal of Environmental Management*, 369, 122341.
 doi:<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.122341>
- Hooge, A., Hauggaard-Nielsen, H., Heinze, W. M., Lyngsie, G., Ramos, T. M., Sandgaard, M. H., . . . Syberg, K. (2023). Fate of microplastics in sewage sludge and in agricultural soils. *Trac-Trends in Analytical Chemistry*, 166, 8. doi:10.1016/j.trac.2023.117184
- Kizinievič, O., Žurauskienė, R., Kizinievič, V., Yakovlev, G., & Bur'yanov, A. (2016). Use of sludge from drinking water purification in the production of effective ceramic articles. *Glass and Ceramics*, 73(1), 58-61.
 doi:10.1007/s10717-016-9825-8
- Konsulova-Bakalova, M., Naskova, P., Malcheva, B., & Plamenov, D. (2023). Modelling a system for "Disinfection-utilization" of sludges from a purification plant for waste waters. *Journal of microbiology, biotechnology and food sciences*, 12(6), e9583. doi:10.55251/jmbfs.9583
- Koukoulakis, P. H., Kanatas, P., Kyritsis, S. S., Ntzala, G., & Kalavrouziotis, I. K. (2023). The impact of the elemental interactions on soil fertility and toxicity in the presence of wastewater and biosolids: A quantitative evaluation. *Water* (20734441), 15(21), 3743. doi:10.3390/w15213743
- Lee, Y.-C., Lo, S.-L., Kuo, J., & Tsai, C.-C. (2011). Beneficial uses of sludge from water purification plants in concrete mix. *Environmental Engineering Science*, 29(4), 284-289. doi:10.1089/ees.2010.0479
- Manea, E. E., & Bumbac, C. (2024). Sludge composting—is this a viable solution for wastewater sludge management?. *Water*, 16(16).
 doi:10.3390/w16162241
- Marchuk, S., Tait, S., Sinha, P., Harris, P., Antille, D. L., & McCabe, B. K. (2023). Biosolids-derived fertilisers: A review of challenges and opportunities. *Science of the Total Environment*, 875.
 doi:10.1016/j.scitotenv.2023.162555

- Marchuk, S., Tait, S., Sinha, P., Harris, P., Antille, D. L., & McCabe, B. K. (2023). Biosolids-derived fertilisers: A review of challenges and opportunities. *Science of the Total Environment*, 875, 162555. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162555>
- Merdy, P., Cherfouh, R., & Lucas, Y. (2024). Long-term agricultural reuse of treated wastewater and sewage sludge: developing a Time to Critical Content Index for metal species. *Environmental Monitoring and Assessment*, 196(9), 836. doi:10.1007/s10661-024-12999-z
- Milojevic, N., & Cydzik-Kwiatkowska, A. (2021). Agricultural use of sewage sludge as a threat of microplastic (MP) spread in the environment and the role of governance. *Energies*, 14(19), 16. doi:10.3390/en14196293
- Minto, A., Gilmour, D., Jorat, M. E., & Tierney, I. (2023). Potential Benefits and Disbenefits of the Application of Water Treatment Residuals from Drinking Water Treatment Processes to Land in Scotland: Development of a Decision Support Tool. *Sustainability*, 15(12). doi:10.3390/su15129268
- Mohajerani, A., Ukwatta, A., & Setunge, S. (2018). Fired-Clay Bricks Incorporating Biosolids: Comparative Life-Cycle Assessment. 30(7), 04018125. doi:doi:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002308
- Mohapatra, D. P., Cledón, M., Brar, S. K., & Surampalli, R. Y. (2016). Application of Wastewater and Biosolids in Soil: Occurrence and Fate of Emerging Contaminants. *WATER AIR AND SOIL POLLUTION*, 227(3). doi:10.1007/s11270-016-2768-4
- Mulopo, J. (2024). A systematic overview of current advancements for chemical, material, and energy production using sewage sludge for industrial ecology and sustainability transition. *Environmental Sustainability*, 7(1), 5-29. doi:10.1007/s42398-023-00301-9
- Poblete, I. B. S., Araujo, O. D. F., & de Medeiros, J. L. (2022). Sewage-water treatment and sewage-sludge management with power production as bioenergy with carbon capture system: A review. *Processes*, 10(4), 21. doi:10.3390/pr10040788
- Popoola, L. T., Olawale, T. O., & Salami, L. (2023). A review on the fate and effects of contaminants in biosolids applied on land: Hazards and government regulatory policies. *Helijon*, 9(10), 27. doi:10.1016/j.helijon.2023.e19788
- Prus, Z., & Wilk, M. (2024). Microplastics in sewage sludge: Worldwide presence in biosolids, environmental impact, identification methods and possible routes of degradation, including the hydrothermal carbonization process. *Energies*, 17(17), 26. doi:10.3390/en17174219
- Qrenawi, L., & Rabah, F. (2021). Sludge management in water treatment plants: Literature review. *International Journal of Environment and Waste Management*, 27(1), 93. doi:10.1504/IJEWWM.2021.111909
- Rodas Purizaga, H. M., Campos Ugaz, W. A., Purizaga Sorroza, M. A., Aguinaga Vasquez, S. J., Bravo Larrea, Y. M., & Ponce-Meza, J. C. (2023). Biosolid quality and its effect on deforested soil. *Environmental & Social Management Journal / Revista de Gestão Social e Ambiental*, 17(5), 1-15. doi:10.24857/rsga.v17n5-007

- Sadzawka, A., Carrasco, M., Flores, H., Grez, R., Mora, M. d. I. L., Neaman, A., . . Sandoval, M. (2015). *Métodos de análisis de lodos y de suelos*. . Chile: Sociedad chilena de la ciencia del suelo.
- Shukla, S., Khan, R., Chrzanowski, L., Vagliasindi, F. G. A., & Roccaro, P. (2025). Advancing sustainable agriculture through multi-omics profiling of biosolids for safe application: A review. *Journal of Environmental Management*, 375, 18. doi:10.1016/j.jenvman.2025.124292
- Tony, M. A. (2022). Valorization of undervalued aluminum-based waterworks sludge waste for the science of "The 5 Rs' criteria". *Applied Water Science*, 12(2), 20. doi:10.1007/s13201-021-01554-7
- Torrado, G. C., & Pérez, F. J. M. (2022). Alternatives to treat sludge from sewage treatment plants: A review. *Ingenieria*, 27(3), 22. doi:10.14483/23448393.17945
- Ukwatta, A., & Mohajerani, A. (2017). Characterisation of fired-clay bricks incorporating biosolids and the effect of heating rate on properties of bricks. *CONSTRUCTION AND BUILDING MATERIALS*, 142, 11-22. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.03.047
- Ukwatta, A., Mohajerani, A., Eshtiaghi, N., & Setunge, S. (2016). Variation in physical and mechanical properties of fired-clay bricks incorporating ETP biosolids. *Journal of Cleaner Production*, 119, 76-85. doi:10.1016/j.jclepro.2016.01.094
- Ukwatta, A., Mohajerani, A., Setunge, S., & Eshtiaghi, N. (2018). A study of gas emissions during the firing process from bricks incorporating biosolids. *Waste Management*, 74, 413-426. doi:<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.01.006>
- Vaithyanathan, V. K., & Cabana, H. (2021). Integrated biotechnology management of biosolids: Sustainable ways to produce value-added products. *Frontiers in Water*, 3, 30. doi:10.3389/frwa.2021.729679
- Wang, D., Hubacek, K., Shan, Y., Gerbens-Leenes, W., & Liu, J. (2021). A review of water stress and water footprint accounting. *Water*, 13(2). doi:10.3390/w13020201
- Wang, H., Brown, S. L., Magesan, G. N., Slade, A. H., Quintern, M., Clinton, P. W., & Payn, T. W. (2008). Technological options for the management of biosolids. *Environmental Science and Pollution Research - International*, 15(4), 308-317. doi:10.1007/s11356-008-0012-5
- Wang, H. L., Brown, S. L., Magesan, G. N., Slade, A. H., Quintern, M., Clinton, P. W., & Payn, T. W. (2008). Technological options for the management of biosolids. *Environmental Science and Pollution Research*, 15(4), 308-317. doi:10.1007/s11356-008-0012-5
- Zhou, T., Li, X., Liu, H., Dong, S. M., Zhang, Z. H., Wang, Z. Y., . . . Wang, Q. L. (2024). Occurrence, fate, and remediation for per-and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in sewage sludge: A comprehensive review. *Journal of Hazardous Materials*, 466, 16. doi:10.1016/j.jhazmat.2024.133637
- Zwane, Q. I., Tshangana, C. S., Mahlangu, O. T., Snyman, L. W., Msagati, T. A. M., & Muleja, A. A. (2024). Hierarchical approach to the management of drinking water sludge generated from alum-based treatment processes. *Processes*, 12(9). doi:10.3390/pr12091863