



FACULTAD DE CIENCIAS DE LA NATURALEZA  
INGENIERÍA EN ENERGÍA Y SUSTENTABILIDAD AMBIENTAL  
SEDE BELLAVISTA

# Reutilización de Lodos Generados en Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Explotaciones Sanitarias S.A.

Proyecto de título para optar al título de Ingeniero en Energía y  
Sustentabilidad

Profesor Guía: Miriam Llona Carrasco

Alumnos: Catalina Carreño Valdés

David Torres Ossandón

Ingeniería en energía y sustentabilidad ambiental

Santiago, Noviembre del 2023

© Catalina Carreño Valdés, David Torres Ossandón.

Se autoriza la reproducción parcial o total de este trabajo, con fines académicos, por cualquier forma, medio o procedimiento siempre y cuando se incluya cita bibliográfica del documento.

#### CALIFICACIÓN DE LA MEMORIA

En Santiago, el \_\_\_\_ de \_\_\_\_ del 2023, los abajo firmantes dejan

constancia que los alumnos Catalina Carreño Valdés y David Torres Ossandón, de la carrera Ingeniería En Energía y Sustentabilidad ha aprobado el proyecto de título para optar al título de Ingeniero en Energía y Sustentabilidad Ambiental con una nota de \_\_\_\_\_.

---

Miriam Llona Carrasco

---

Carlos Galarce

## Resumen

El proceso de tratamiento de aguas residuales genera grandes cantidades de lodos, lo cual ha aumentado con el desarrollo industrial y de la población. Esta situación genera la necesidad de desarrollar nuevos métodos para reutilizar los lodos generados en el proceso de tratamiento de aguas. La reutilización de los lodos como abono al suelo es una alternativa viable para reducir el volumen de lodos como desperdicio. Se ha reportado que la incorporación de lodos al suelo ha mejorado su calidad, permitiendo su restauración. No obstante, los lodos producidos pueden contener contaminantes, como metales pesados, que dificultan la implementación de esta alternativa. Dado este escenario, este trabajo tiene como objetivo principal la evaluación de diversos métodos para la remoción de metales pesados, específicamente cobre (Cu) y zinc (Zn) contenidos en los lodos producidos por la depuración de aguas contaminadas para el caso de la empresa “Explotaciones Sanitarias S.A”. Los resultados de esta investigación permitirán proponer una nueva cadena de valor a los procesos actuales, los cuales serán capaces de ofrecer la reutilización de los lodos para áreas como la agricultura, parques de recreación entre otros.

Para lograr el objetivo principal se realizó una revisión bibliográfica con el fin de decidir cuál proceso resultaría beneficioso para la planta en la remoción de contaminantes metálicos. El análisis de los datos operativos de la empresa “Explotaciones Sanitarias S.A.” permitieron identificar los contaminantes más relevantes a remover. Con ello, se propone implementar un proceso de remoción química, el cual se basa en el uso de minerales arcillosos Na-bentonita y Ca-bentonita. La selección de este proceso se basa en su bajo costo de operación en comparación con el carbón activado, ya que ambos poseen el mismo mecanismo de acción para captar metales pesados en los lodos residuales. Finalmente, se evaluaron diversos procesos de fitorremediación, complementarios a los ya mencionados. Los análisis demuestran la efectividad del método de minerales arcillosos como un proceso eficiente para la planta, permitiendo su utilización como abono para el suelo. La implementación de esta metodología podría permitir a la planta Explotaciones Sanitaria S.A mejorar la calidad de sus lodos.

## **Abstract**

The production of sludge by companies or treatment plants has increased over time due to remarkable industrial and human growth. This has led to the search for new ways of removing and eliminating pollutants, and reusing sludge for different purposes and processes. These efforts can contribute to having a more sustainable and pollution-free environment by reducing the impact on the soil and improving its quality. Our objective was to evaluate various methods for removing heavy metals, specifically copper (Cu) and zinc (Zn), from the sludge produced by the treatment of contaminated water at "Explotaciones Sanitarias S.A." We also aimed to propose a new chain of processes that would enable sludge reuse for areas such as agriculture, recreation parks, and others. Initially, we conducted a bibliographic review to identify the most effective process for removing metallic contaminants. We then analyzed the plant data and created graphs based on the data collected during 2021-2022 to locate the most notorious pollutants. Based on our research, we proposed a process involving the clay minerals Na-bentonite and Ca-bentonite. This is a cheaper process than activated carbon that works with the exact mechanism as it is to capture heavy metals in residual sludge. Finally, we investigated the existing phytoremediation processes to determine whether they could be applied as a support or a heavy metal polish in the previously treated sludge. Our investigations showed that the method of clay minerals or mineralized clay gave an efficient and applicable process for the treatment plant, meeting the requirements. In addition, a bibliographical review and SWOT analysis resulted in rhizofiltration as a biological support method.

## Índice de contenidos

<b>Resumen.....</b>	<b>3</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>4</b>
<b>Introducción.....</b>	<b>7</b>
<b>Marco Teórico.....</b>	<b>9</b>
1. Tipos de Aguas Residuales.....	9
1.2 Aguas residuales industriales y su composición.....	9
1.3 Definición de lodos.....	10
1.4 Lodos residuales industriales.....	10
1.5 Lodos, características y presencia en plantas de tratamiento de aguas residuales.	11
1.6 Tipología de lodos.....	11
1.7 Disposición final de lodos tratados.....	13
2. Planta de tratamiento.....	13
Pretratamiento.....	14
Tratamiento primario.....	14
Tratamiento secundario.....	14
Desinfección.....	15
2.1 Área de estudio.....	15
Ubicación Geográfica.....	15
Ubicación Planta de Tratamiento en la Comuna de Quilicura.....	17
3. Normativa nacional de aguas para alcantarillado, para cultivo y de uso potable.....	18
Decreto Supremo 148.....	18
Decreto Supremo 90.....	18
Decreto Supremo 609.....	18
3.1 Niveles límite de lodo contaminante como compost.....	19
3.2 Niveles máximos permitidos de metales pesados por normativa nacional.....	19
4. Metales pesados, características, niveles o presencia en lodos residuales y daños a la	

salud de los organismos.....	20
4.1 Presencia de metales pesados, fuente y presencia en aguas contaminadas.....	22
4.2 Características generales de metales pesados.....	22
4.3 Características específicas de metales pesados.....	22
4.3.1 Cromo.....	22
4.3.2 Mercurio.....	23
4.3.3 Cobre (Cu).....	23
4.3.4 Zinc (Zn).....	23
4.3.5 Níquel.....	23
4.3.6 Plomo.....	24
4.3.7 Arsénico.....	24
4.3.8 Cadmio.....	24
4.3.9 Cobalto.....	25
4.3.10 Hierro.....	25
4.4 Generación de metales pesados de origen antropogénico.....	26
5. Peligros a corto y largo plazo para la salud de los organismos vivientes.....	27
5.1 Daños a la salud y ecosistema por metales incluidos en lodos mal depurados durante el proceso de tratamiento de aguas residuales.....	28
6. Métodos y técnicas de remediación junto con sus aplicaciones.....	29
6.1 Precipitación Química.....	30
6.2 Coagulación y floculación.....	30
6.3 Flotación.....	31
6.4 Proceso de intercambio de iones.....	32
6.5 Proceso de Adsorción.....	32
6.6 Uso de arcillas como proceso de adsorción.....	34
6.7 Remediación de suelos con lodos tratados mediante métodos biológicos.....	34
6.7.1 Fitorremediación.....	34



UNIVERSIDAD  
SAN SEBASTIAN

6.7.2 Fitoextracción.....	34
6.7.3 Fitoestabilización.....	35
6.7.4 Rizofiltración.....	35
<b>Problemática.....</b>	<b>36</b>
Objetivo general.....	36
Objetivos específicos.....	37
<b>Marco Metodológico.....</b>	<b>37</b>
1. Funcionamiento y composición de los lodos en la planta modelo.....	37
2. Evaluación de métodos aplicables para la remoción de contaminantes en lodos.....	38
2.1 Selección según tecnología a aplicar.....	39
2.2 Evaluación cualitativa de la metodología seleccionada mediante análisis FODA.....	39
2.3 Selección de propuesta final.....	41
3. Evaluación económica de manejo y gastos actuales de los lodos de la PTA.....	41
<b>4. Resultados.....</b>	<b>42</b>
4.1 Datos obtenidos desde la planta modelo de tratamiento de agua. (OE1).....	42
4.2 Métodos a utilizar en la planta de tratamiento (OE2).....	54
4.2.1 Análisis métodos físicos, químicos y biológicos factibles para la remoción de metales pesados, en específico para Cobre y Zinc presentes en lodos residuales.....	54
4.2.2 Análisis FODA para procesos de fitorremediación.....	56
Fitoextracción.....	57
Rizofiltración.....	58
4.3 Propuestas económicas en relación con método de arcillas y rizofiltración (OE3).....	59
4.3.1 Manejo actual de los lodos en la PTA.....	59
4.3.2 Gastos operacionales actuales de los lodos en la PTA.....	61
4.3.3 Costos de los métodos a utilizar para la disminución de metales pesados en los lodos.....	63
Método Na-Bentonita y Ca-Bentonita.....	63

Método de Rizofiltración.....	66
<b>5. Discusión.....</b>	<b>66</b>
<b>6. Conclusiones.....</b>	<b>70</b>
<b>7. Referencias.....</b>	<b>71</b>

## Índice de Tablas

Tabla 1. Composición física y química del lodo (Metcalf & Eddy, 2003).....	15
Tabla 2. Contenido máximo mg/kg de elementos traza para compostaje (NCH2880, 2003)..	22
Tabla 3. Contenido máximo mg/kg de elementos traza orgánicos para compostaje. (NCH2880, 2003).....	22
Tabla 4. Especificaciones y límites de metales pesados señalados en el Decreto 90 (Biblioteca Congreso Nacional de Chile, Ley Chile).....	23
Tabla 5. MCL Estándares para metales pesados más peligrosos (Babel y Kurniawan, 2003).24	
Tabla 6. Generación o procedencia de metales pesados por actividad humana. (Gautam, et al. 2016).....	30
Tabla 7. Efectos adversos en la salud de seres humanos y organismos producto de envenenamiento por metales pesados. (Gautam, et al. 2016).....	31
Tabla 8. Resultados de los informes entregados por el laboratorio SGS a la planta modelo “Explotaciones Sanitarias S.A”. (Elaboración propia, 2022).....	53
Tabla 9. Análisis FODA de fitoextracción. Creación propia.....	61
Tabla 10. Análisis FODA de rizofiltración. Creación propia 2022.....	62
Tabla 11. Cálculo de gastos Planta periodo marzo a septiembre “Explotaciones Sanitarias”. Creación propia, 2022.....	64
Tabla 12. Cálculo de gastos Planta periodo octubre a febrero “Explotaciones Sanitarias”. Creación propia, 2022.....	65
Tabla 13. Cálculo de ventas anual del material lodo fertilizante “Explotaciones Sanitarias”. Creación propia. 2022.....	66
Tabla 14. Cálculo de precio mercado para la Ca-Bentonita. Creación propia en base a información por parte de la Empresa Productos Químicos. 2022.....	67



Tabla 15. Cálculo de precio mercado para la Na-Bentonita. Creación propia en base a información por parte de la Empresa Productos Químicos. 2022..... 68

Tabla 16. Nombres, valores y cantidad de plantas a utilizar para el terreno. Creación propia 2022..... 69

## Índice de Figuras

Figura 1. Esquema proceso de tratamiento en planta de tratamiento de agua residual (Chamy, 2018)..... 17

Figura 2. Ubicación geográfica Región Metropolitana (Fuente: Google Earth)..... 19

Figura 3. Límites geográficos Comuna Quilicura (Fuente: Google Earth)..... 19

Figura 4. Ubicación geográfica Planta de Tratamiento de Aguas, Explotaciones Sanitarias. (Fuente: Google Earth)..... 20

Figura 5. Proceso de precipitación química (Qasem, et al. 2021)..... 33

Figura 6. Proceso de tratamiento de Coagulación y Floculación (Qasem, et al. 2021)..... 34

Figura 7. Proceso de flotación. (Qasem, et al. 2021)..... 35

Figura 8. Diferencia de adsorción y absorción, (Moreno 2005)..... 44

Figura 9: entrada de las aguas al pretratamiento. (Recuperado: Carreño. C, 2022)..... 45

Figura 10: Tornillo del pretratamiento. (Recuperado: Carreño. C, 2022)..... 46

Figura 11: Motor blowers. (Recuperado: Carreño. C, 2022)..... 46

Figura 12: Eliminación de arenas. (Recuperado: Carreño. C, 2022)..... 47

Figura 13: Eliminación de grasas. (Recuperado: Carreño. C, 2022)..... 47

Figura 14: Ingreso a las lagunas aireadas. (Recuperado: Carreño. C, 2022)..... 48

Figura 15: Lagunas aireadas (Recuperado: Carreño. C, 2022)..... 48

Figura 16 & 17: lagunas de sedimentación. (Recuperado: Carreño. C, 2022)..... 49

Figura 18 & 19: Bombas de succión de Lodos. (Recuperado: Carreño. C, 2022)..... 49

Figura 20: Aireador tornado equipado con motor de 3 Hp. (Recuperado: Carreño. C, 2022). 50

Figura 21: Piscina de espesamiento de los lodos. (Recuperado: Carreño. C, 2022)..... 50

Figura 22: Piscina acumuladora de lodos. (Recuperado: Carreño. C, 2022)..... 51

Figura 23: Lodos sólidos. (Recuperado: Carreño. C, 2022).....	51
Figura 24: Secado de lodos (Recuperado: Carreño. C, 2022).....	52
Figura 25: Humedal los esteros de Quilicura. (Recuperado: Carreño. C, 2022).....	52
Figura 26. Cambios en los metales pesados extraíbles en agua después de la adición de minerales arcillosos durante el experimento (Usman, et al. 2005).....	59
Figura 27: Diagrama de flujo de la línea de Lodos en la planta modelo (Elaboración propia, 2022).....	63
Figura 28: Unidad de deshidratación (Recuperado: Carreño. C, 2022).....	63

### **Índice de Gráficos**

Gráfico 1. Muestreos de concentraciones del zinc realizados por el Laboratorio SGS. (Elaboración propia, en base a informes de la planta Explotaciones Sanitarias S.A).....	54
Gráfico 2. Muestreos de las concentraciones del cobre realizados por el Laboratorio SGS. (Elaboración propia, en base a informes de la planta Explotaciones Sanitarias S.A).....	55
Gráfico 3. Representación del comportamiento del cobre y el zinc con presencia de humedad en lodos secos. (Elaboración propia, en base a informes de la planta Explotaciones Sanitarias S.A).....	56
Gráfico 4. Representación gráfica del comportamiento del zinc y el cobre en presencia del pH en la planta modelo. (Elaboración propia, en base a informes de la planta Explotaciones Sanitarias S.A).....	56

## Introducción

Según una iniciativa de la práctica mundial del agua, del Banco Mundial el 80% de las aguas residuales, ya sean industriales o domiciliarias son vertidas en el medio ambiente sin tratamientos previos. El tratamiento adecuado de las aguas residuales es de gran importancia en el mundo para evitar la contaminación y la escasez del agua, de esta manera potenciar su reúso en riegos, fines industriales, usos recreativos, incluso disminuir la necesidad de agua limpia en la población. Sin embargo las plantas de tratamientos de aguas, pueden generar subproductos llamados lodos, si sus parámetros universales establecidos para las aguas residuales o de control son estables pueden ser utilizados como fertilizantes o en la recuperación de suelos (Pozo, 2021).

Conforme a la segunda evaluación de desempeño ambiental de Chile (2016) realizada por la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) en colaboración con la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) de las Naciones Unidas, Chile ocupa el segundo lugar entre los 34 países miembros de esta organización, en cuanto a la cantidad de residuos que son enviados a rellenos sanitarios y vertederos (Leyton, 2019). Y de acuerdo con el informe chileno del estado del medio ambiente en 2018, los residuos no peligrosos se distribuyen de la siguiente manera: 53,4% provienen de actividades industriales, el 1,8% son lodos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales, y el 41,7% corresponde a residuos municipales. De estos, únicamente el 21,89% se somete a procesos de valorización, mientras que el 78,11% restante se elimina sin aprovechamiento. En cuanto a los lodos generados por las plantas de tratamiento de aguas residuales, su mayor concentración se encuentra en la Región Metropolitana, con un volumen de 198.085 toneladas en el año 2018, lo que representa un 57,8% del total a nivel nacional conforme a las declaraciones de las empresas sanitarias en el SINADER.

En la actualidad, en Chile, existen normativas que las plantas de tratamiento de agua deben seguir rigurosamente para llevar a cabo de manera adecuada el proceso de limpieza de las aguas. No obstante, en ocasiones, cumplir con todos los parámetros establecidos por las normas chilenas resulta ser un desafío debido a las diversas composiciones que pueden presentar las aguas residuales al ingresar a una planta de tratamiento, Un ejemplo concreto de esta situación se puede observar en el caso de la planta de tratamiento conocida como

Explotaciones Sanitarias SA. En sus últimos análisis de control realizados en la planta, se encontraron niveles ligeramente elevados de zinc y cobre en comparación con los estándares establecidos por las regulaciones chilenas que deben seguirse para que los lodos generados puedan ser sometidos a procesos de valorización. Por lo tanto, la presente investigación tiene como objetivo principal la búsqueda de tratamientos para reducir las concentraciones de metales pesados, en particular, el cobre y el zinc, en la planta de tratamiento de agua residual de Explotaciones Sanitarias SA, ubicada en la comuna de Quilicura. Esta iniciativa se origina a raíz del interés de la empresa en reducir sus costos anuales relacionados con la disposición final de los lodos generados en la planta, al mismo tiempo que contribuirá a la disminución de las toneladas de residuos que se envían a los rellenos sanitarios en Chile.

## **Marco Teórico**

En las plantas de tratamiento de aguas, es común recibir aguas contaminadas con composiciones muy diversas. Estas aguas pueden contener una amplia variedad de contaminantes y elementos. La diversidad en la composición de las aguas residuales exige que las plantas de tratamiento implementen sistemas y tecnologías versátiles para garantizar que el agua resultante cumpla con los estándares de calidad ambiental y de salud pública.

### **1. Tipos de Aguas Residuales**

1. Aguas residuales domésticas: Este tipo de aguas residuales se originan en viviendas y resultan principalmente de los procesos metabólicos humanos, así como de las actividades cotidianas realizadas en el ámbito doméstico.
2. Aguas residuales industriales: En esta categoría se incluyen todas las aguas residuales que provienen de instalaciones con propósitos comerciales o industriales.
3. Aguas residuales urbanas: Este término engloba las aguas que contienen tanto desechos domésticos como industriales. También se refiere a aquellas que incorporan aguas de escorrentía pluvial.

Las aguas residuales ganaderas suelen estar contaminadas con microorganismos y materia orgánica. La falta de un tratamiento adecuado puede dar lugar a la posibilidad de contaminar pozos y acuíferos subterráneos (Laws, 2003). Por otro lado, las aguas residuales agrícolas, caracterizadas por un exceso de fertilizantes y pesticidas, representan un riesgo potencial para

causar daños irreversibles no solo en las aguas subterráneas, sino también en embalses, ríos y mares (Prats, 2001).

## **1.2 Aguas residuales industriales y su composición**

Se hace referencia a aguas residuales industriales como aquellas que contienen impurezas provenientes de descargas de diversas fuentes industriales, y que pueden incluir elementos contaminantes. Estas aguas se originan mayormente a partir de actividades humanas en sectores industriales (Galvis, 2013). Si no se someten a un tratamiento adecuado, estas aguas pueden representar un potencial peligro para el medio ambiente, ya que cualquier liberación o filtración de sustancias tóxicas podría desencadenar desastres ecológicos (Rivera, 2013).

A través de diversos procedimientos de tratamiento, estas aguas pueden ser reintegradas al entorno natural sin causar un impacto significativo en el medio ambiente y en la vida silvestre. Estos procesos se llevan a cabo en las estaciones depuradoras de aguas residuales, cuyo objetivo es la producción de agua limpia o apta para su reutilización.

## **1.3 Definición de lodos**

La EPA (Environmental Protection Agency, 2013) a nivel mundial, usa la palabra “lodo” como sinónimo de Biosólido. Estos están definidos como basura o desecho de residuo semisólido que hayan sido generados en las plantas de tratamiento de aguas. Además, hace diferencia entre distintos tipos de lodo.

Aquellos subproductos de la remoción de contaminantes del agua residual, uno de los más importantes en el tratamiento de aguas residuales, por sus volúmenes y por su posterior tratado que requiere, son producidos principalmente en las etapas de tratamiento primario y tratamiento secundario del agua residual (Díaz, 2015).

A continuación se describen los principales tipos de lodos producidos por el tratamiento de aguas residuales y sus características.

## **1.4 Lodos residuales industriales**

Estos lodos, que consisten en una mezcla de sólidos y líquidos, contienen una variedad de contaminantes que pueden incluir productos químicos tóxicos, metales pesados, materia orgánica y otros compuestos nocivos.

El tratamiento y la disposición final de los lodos residuales industriales son procesos críticos en la gestión de residuos industriales. A través de diversas técnicas de tratamiento, como la

sedimentación, la filtración, la deshidratación, la digestión anaeróbica o aeróbica, y la incineración, es posible reducir la concentración de contaminantes en los lodos y convertirlos en materiales más seguros y manejables (Rivera,2013).

Una vez tratados, los lodos residuales industriales pueden tener diversos destinos. En algunos casos, se pueden utilizar como fertilizantes agrícolas o en aplicaciones de recuperación de energía. En otros casos, se requiere su disposición en vertederos o su incineración controlada para garantizar la seguridad ambiental (García, 2006).

Es importante que las empresas industriales adopten prácticas responsables en la gestión de lodos residuales, siguiendo las regulaciones vigentes y aplicando tecnologías avanzadas para minimizar su impacto ambiental. Además, la monitorización constante de la calidad de los lodos y su tratamiento adecuado son fundamentales para prevenir la contaminación y promover la sostenibilidad en el sector industrial (Moreno, 2012).

En resumen, la gestión de lodos residuales industriales es un componente esencial de la responsabilidad ambiental de las industrias, y su manejo adecuado contribuye a la preservación del medio ambiente y al cumplimiento de las normativas ambientales.

### **1.5 Lodos, características y presencia en plantas de tratamiento de aguas residuales**

Los contaminantes que contienen las aguas tratadas son eliminados en gran medida por la absorción en el lodo producto de los tratamientos físico químico o biológico, el lodo resultante de estos procesos debe ser sometido a un análisis para determinar sus características y clasificarlo como un residuo peligroso o no peligroso. En base a esto se pueden determinar las alternativas para su manejo y disposición.

Los lodos primarios se producen en la sedimentación primaria, en la cual se remueven sólidos sedimentables. En esta etapa es donde se produce mayor cantidad de lodo, producto de una mayor remoción y de la precipitación química de la materia coloidal (García, 2006).

Los lodos secundarios se producen en los reactores biológicos y se separan del agua en los sedimentos secundarios. Estos tienen un embudo para almacenar y concentrar los lodos sedimentados. La extracción de los lodos sedimentados se efectúa por carga hidráulica, es decir, por la presión ejercida del fluido en el punto de descarga y por el accionamiento mecánico de las rastras que “barren” el fondo del tanque, empujando los lodos sedimentados al embudo para su extracción (Macías, 2013).

## 1.6 Tipología de lodos

Las características de los lodos dependen de su origen, su tiempo de retención en las PTAR y el tipo de tratamiento que han recibido. A continuación, se presenta la composición típica de los lodos producidos y tratados.

Concepto	Unidad	Lodo primario	Lodo secundario
Concentración sólidos	%	5-9	0,8-1,2
Sólidos volátiles	% ST <sub>1</sub>	60-80	59-88
Proteína	% ST	20-30	32-41
Nitrógeno	% ST	1,5-4	2,4-5
Fósforo	% ST	0,8-2,8	2,8-11
Óxido de potasio	% ST	0-1	0,5-0,7
Celulosa	% ST	8-15	-
Hierro	% ST	2-4	-
Óxido de silicio	% ST	15-20	-
pH	u. pH	5-8	6,5-8
Alcalinidad	mg CaCO <sub>3</sub> /l	500-1,500	580-1,100
Ácidos orgánicos	mg HAc/l	200-2,000	1,100-1,700
Contenido energético	kJ ST/kg	23,000-29,000	19,000-23,000

Tabla 1. Composición física y química del lodo (Metcalf & Eddy, 2003)

El volumen de un lodo dependerá del contenido de humedad que este contenga, un lodo primario tiene de 91-95% de humedad, en cambio un lodo secundario tiene desde el 98-99% de humedad (Metcalf & Eddy, 2003)

A continuación, se describen las categorías de los lodos:

1. Lodos categoría A: Lodo sin restricciones sanitarias para la aplicación a suelo. En este punto, la EPA es más específica, al denominarlos Biosólidos de Calidad Excepcional,

que son aquellos que son poco contaminantes y tienen reducción de patógenos Clase A y que han reducido el nivel de componentes degradables que atraen vectores.

2. Lodo categoría B: Lodo apto para la aplicación al suelo, con restricciones sanitarias de aplicación según tipo y localización de los suelos o cultivos. La EPA los denomina como Biosólidos con concentración de contaminantes y los define como aquellos Biosólidos que también logran los mismos bajos límites de concentración de contaminantes de los de Clase A, pero solo logran una reducción de patógenos clase B y/o están sujetos a la administración en el sitio mismo, más que como una alternativa de tratamiento para reducir vectores.
3. Lodo categoría C: Lodo que no cumple con alguno de los parámetros definidos para las categorías A o B y que son considerados como residuos peligrosos de acuerdo con la Normativa Ambiental vigente.

### **1.7 Disposición final de lodos tratados**

En esta situación, la eliminación definitiva de lodos se considera como la gestión de residuos peligrosos y, por lo tanto, está sujeta a la regulación establecida en la Ley 148, que es el reglamento sanitario para el manejo de residuos peligrosos emitido por el Ministerio de Salud el 16 de junio de 2004. En cuanto al lugar o sitio de disposición, el decreto establece en su Título IX, bajo el apartado de "Disposiciones adicionales y de referencia" en el Artículo 86, que las únicas operaciones permitidas para la eliminación de residuos peligrosos son las siguientes:

A) Aquellas operaciones que no tienen el propósito de recuperar recursos, reciclar, regenerar, reutilizar o cualquier otro uso sostenible.

A.1 Se refiere al depósito permanente en o sobre la tierra, como por ejemplo, en minas subterráneas.

A.2 Se refiere al tratamiento en el suelo, que incluye la biodegradación de residuos líquidos o lodos en el suelo, entre otras técnicas (Extracto de la Ley 148 del Ministerio de Salud de 2004).



## 2. Planta de tratamiento

Son instalaciones de ingeniería que se encargan de una serie de procesos físicos, químicos y biológicos para la limpieza del agua y posteriormente ser utilizadas en distintos fines. (Ramón, 2011). Los procesos de las plantas de tratamiento consisten en:

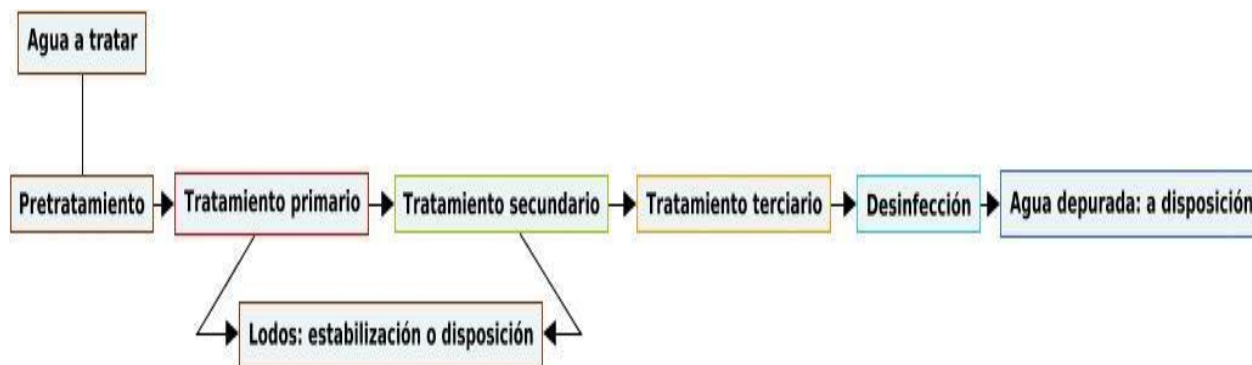


Figura 1. Esquema proceso de tratamiento en planta de tratamiento de agua residual (Chamy, 2018).

### a. Pretratamiento

Mecanismo que se utiliza para remover residuos sólidos, grasas y arenas expuestas en las aguas industriales que ingresan a la planta con el fin de facilitar el tratamiento primario o posterior a este. Son instalaciones que permiten el acondicionamiento del agua, previo al tratamiento, cuyo fin es retener sólidos gruesos, plásticos, material flotante, grasas y material rápidamente sedimentable. El retiro de estos sólidos y materiales permite prever posibles obstrucciones y perjuicios de los procesos de tratamiento que se consideren en la Planta de Aguas Residuales. Es importante que la planta de tratamiento incluya como parte del pretratamiento una unidad de medición de caudal, esto puede ser a través de una canaleta o también pueden usarse vertederos graduados para registros del nivel y cálculo de caudales. Toda planta de tratamiento debe tener como mínimo una cámara de rejillas, un desarenador y un sistema de medición de caudal, ya sea de canaleta o vertedero de control (Guerra, 1996).

### b. Tratamiento primario

Eliminan los sólidos en suspensión presentes en el agua, por medio de un proceso llamado sedimentación donde existe un mecanismo de separación por gravedad que hace que una partícula más densa que el agua tenga una trayectoria descendente depositándose en el fondo del agua tratada. Se hace en tanques de sedimentación que cuentan con un sistema de

bombeo. El objetivo de estos contenedores es producir un líquido que pueda ser tratado al estar descontaminado de residuos como materia fecal, que queda en el fondo del tanque (Rojas, 2002). También se separan grasas y plásticos que se logran desnatar al elevarse sobre la superficie de los contenedores (Reynolds, 2001).

### **c. Tratamiento secundario**

El fin de este tratamiento es seguir reduciendo los desechos contenidos en el agua tratada, es necesario usar procesos aeróbicos con plantas o bacterias que eliminan aquellos contaminantes que quedaron y no pudieron ser removidos, basados en principios biológicos en esta parte del proceso se emplean microorganismos que permiten la eliminación de materia orgánica biodegradable. Del mismo modo, aquellos también permiten la eliminación de compuestos que contienen nutrientes como el nitrógeno y el fósforo. (Rojas, 2002).

### **d. Desinfección**

La desinfección en las plantas de tratamiento de aguas es un proceso esencial para garantizar que el agua industrial sea segura para su consumo y uso. Este paso crucial tiene como objetivo principal eliminar o inactivar los microorganismos patógenos presentes en el agua, como bacterias, virus y parásitos, que pueden representar riesgos para la salud humana (Smith et al., 2018). Uno de los métodos más comunes de desinfección es el uso de productos químicos, como el cloro. El cloro se agrega al agua en una etapa específica del proceso de tratamiento y actúa como un agente oxidante que destruye los microorganismos perjudiciales. Este método ha sido ampliamente utilizado en todo el mundo y ha demostrado ser eficaz en la eliminación de patógenos (Rodríguez, 2013).

## **2.1 Área de estudio**

### **a. Ubicación Geográfica**

El área para analizar compromete a la Comuna de Quilicura ( $33^{\circ}21' 26''S$   $70^{\circ}43' 45''W$ ), ubicada en la Ciudad de Santiago, Región Metropolitana. Quilicura se conocía durante el siglo XIX como un pueblo de carácter agrícola, donde su crecimiento se vio influenciado por dicha actividad junto a la existencia de una vía ferroviaria. El significado de Quilicura proviene del Mapudungun y significa “Tres piedras” haciendo alusión a los tres cerros que la

rodean. Durante varios años fue parte de la Comuna de Renca, hecho que terminó cuando Quilicura fue oficialmente fundada el día 10 de agosto de 1901 (Durán, 1967).

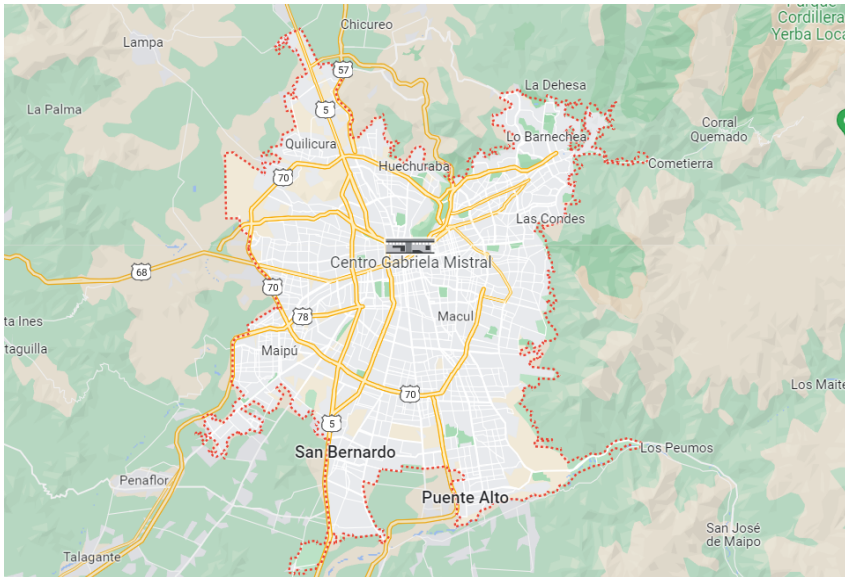


Figura 2. Ubicación geográfica Región Metropolitana (Fuente: Google Earth).



Figura 3. Límites geográficos Comuna Quilicura (Fuente: Google Earth).

La comuna de Quilicura presenta una superficie de 58 km<sup>2</sup>, una población, la cual ha aumentado durante los años, de un total de 248.147 Habitantes (210.410 habitantes para el Censo 2017) junto a una densidad de 3659,3 Hab/km<sup>2</sup> (Censo Entrega Final, 2017).

El clima presente es de carácter mediterráneo y sus temperaturas varían de 13°C anualmente a altas de 30°C en periodo de verano. Por otra parte, los meses de julio y agosto presentan una humedad relativa de 59% y las precipitaciones son de mayor carácter en el mes de junio con unos 67 mm (Espinoza, 2014).

En relación con su topografía, es seguro señalar que es de carácter llana con una tendencia a presentar secciones onduladas producto de ciertas lomas, o conos, lo que dificulta un drenaje efectivo en el territorio (Durán, 1967).

#### **b. Ubicación Planta de Tratamiento en la Comuna de Quilicura**

La planta de Tratamiento de aguas Explotaciones Sanitarias S.A se encuentra ubicada en Las Esteras Norte 2201 Quilicura y fue fundada el 31 de octubre de 1989. La Planta opera en su totalidad prestando servicios como producción, distribución, recolección, tratamiento y disposición de aguas residuales de Quilicura, bajo los D.F.L. N°382 y N°70 de 1988, del Ministerio de Obras Públicas (Ley General de Servicios Sanitarios, Ministerio de Obras Públicas 1989).



Figura 4. Ubicación geográfica Planta de Tratamiento de Aguas, Explotaciones Sanitarias. (Fuente: Google Earth).

Para el año 2018 la empresa reportó un total de 35 empleados, con un aumento en ingresos netos del 6,93%. El activo total registró un crecimiento del 0,24% mientras que el margen neto de la empresa cayó un 3,54% durante el mismo año (Informe compañía ESA, 2018).



### **3. Normativa nacional de aguas para alcantarillado, para cultivo y de uso potable.**

En el siguiente apartado se describirán los decretos supremos más relevantes para el tratado de plantas de tratamiento de aguas residuales, domésticas e industriales en Chile.

#### **a. Decreto Supremo 148**

Este Reglamento establece las condiciones sanitarias y de seguridad mínimas a que deberá someterse la generación, tenencia, almacenamiento, transporte, tratamiento, reuso, reciclaje, disposición final y otras formas de eliminación de los residuos peligrosos.

Le corresponderá a la Autoridad Sanitaria fiscalizar y controlar el cumplimiento de las disposiciones del presente reglamento y del Código Sanitario en estas materias, todo ello de acuerdo con las normas e instrucciones generales que imparta el Ministerio de Salud (Ministerio de salud de Chile, 2004).

#### **b. Decreto Supremo 90**

La presente norma tiene como objetivo de protección ambiental prevenir la contaminación de las aguas marinas y continentales superficiales de la República, mediante el control de contaminantes asociados a los residuos líquidos que se descargan a estos cuerpos receptores.

Con lo anterior, se logra mejorar sustancialmente la calidad ambiental de las aguas, de manera que éstas mantengan o alcancen la condición de ambientes libres de contaminación, de conformidad con la Constitución y las Leyes de la República (Ministerio secretaría general de la presidencia de Chile, 2001).

#### **c. Decreto Supremo 609**

La presente norma de emisión tiene como objetivo mejorar la calidad ambiental de las aguas servidas que los servicios públicos de disposición de éstas vierten a los cuerpos de agua terrestres o marítimos mediante el control de los contaminantes líquidos de origen industrial, que se descargan en los alcantarillados. Con lo anterior se logra que los servicios públicos de disposición de aguas servidas dispongan aguas residuales con un bajo nivel de contaminación, protegiendo así los cuerpos de agua receptores (Ministerio de obras públicas de Chile, 1998).

### 3.1 Niveles límite de lodo contaminante como compost

Acorde a la Norma Chilena 2880 (NCH 2880) los niveles mínimos y/o máximos permitidos para usar el lodo depurado con la intención de compostaje se muestran en la siguiente Tabla 2.

Elementos Traza	Contenido máximo (mg/kg) base seca
Cadmio	10
Cromo	1000
Cobre	1000
Mercurio	10
Níquel	200
Plomo	800
Zinc	3000
Cromo+Cobre+Níquel+Zinc	4000

Tabla 2. Contenido máximo mg/kg de elementos traza para compostaje. (NCH2880, 2003)

Elementos traza orgánicos	Contenido máximo (mg/kg) base seca
Fluoranteno	5
Benzo fluoranteno	2,5
Benzopireno	2

Tabla 3. Contenido máximo mg/kg de elementos traza orgánicos para compostaje. (NCH2880, 2003)

### 3.2 Niveles máximos permitidos de metales pesados por normativa nacional

El Decreto 90 de la legislación chilena tiene como finalidad regular las emisiones de contaminantes que están relacionadas con las descargas de residuos líquidos en cuerpos de agua marinos y continentales superficiales. Este decreto establece los límites máximos de concentración de contaminantes permitidos para los residuos líquidos que son liberados por las fuentes emisoras hacia los cuerpos de agua marinos y continentales superficiales en la República de Chile (Ministerio Secretaría General de la Presidencia de Chile, 2001).

Dentro del contexto de esta regulación, vamos a examinar el procedimiento que se lleva a cabo dentro de la planta Explotaciones Sanitarias S.A con el propósito de realizar un análisis detallado, en cumplimiento con lo establecido en el Decreto 90.

A continuación, se expone la Tabla 6 que incluye solo los metales pesados y su máxima carga:

Contaminante	Valor Característico	Carga contaminante media diaria (equiv. 100 hab/día)
Arsénico	0,05 mg/L	0,8 g/d
Cadmio	0,01 mg/L	0,16 g/d
Cobre	1 mg/L	16 g/d
Cromo Total	0,1 mg/L	1,6 g/d
Cromo Hexavalente	0,05 mg/L	0,8 g/d
Hierro	1,0 mg/L	16 g/d
Mercurio	0,001 mg/L	0,02 g/d
Plomo	0,2 mg/L	3,2 g/d
Zinc	1 mg/L	16 g/d
Aluminio	1 mg/L	16 g/d

Tabla 4. Especificaciones y límites de metales pesados señalados en el Decreto 90. (Biblioteca Congreso Nacional de Chile, Ley Chile)

#### **4. Metales pesados, características, niveles o presencia en lodos residuales y daños a la salud de los organismos.**

Debido al aumento de la población y la acelerada industrialización (o modernización), la reducción de elementos contaminantes a escala global es el punto de mira para los procesos de depuración actuales, mejorando así la obtención y/o reutilización de recursos ya tratados.

Es por eso que el objetivo de reducir la presencia de contaminantes en aguas tratadas es de suma importancia.

Los Metales Pesados son aquellos que presentan una densidad característica de 5 gramos por centímetro cúbico, lo que provoca que al entrar en contacto con el agua dichos elementos sean altamente solubles en el agua lo que complica su remoción. Además, dichos

contaminantes son conocidos por ser altamente tóxicos en cantidades aún pequeñas y ser causantes de otras enfermedades además de ser agentes carcinógenos. (Journal of Multidisciplinary science studies, 2015)

Metales pesados que son conocidos dentro de las aguas residuales y/o lodos: Cobre, Plata, Zinc, Cadmio, Oro, Mercurio, Plomo, Cromo, Hierro, Níquel, Estaño, Arsénico, Selenio, Molibdeno, Cobalto, Manganeso y Aluminio.

Cada elemento previamente señalado es causante de graves complicaciones a la salud, inclusive letales, ya sean para el ser humano, flora y/o fauna. En la mayoría de los casos estos contaminantes pueden ser absorbidos por el cuerpo humano causando serios daños y enfermedades como Cáncer, daños al tejido, daños a los órganos, daños al sistema nervioso y en casos extremos la muerte. En caso de estar en presencia de estos contaminantes, los niños/as pueden ver reducido su crecimiento y desarrollo.

Para evitar las concentraciones de estos contaminantes se han creado regulaciones con el fin de reducir la cantidad de metales pesados al momento del tratamiento y descarga. El Máximo Nivel de Contaminación (Maximum Contaminated Level, MCL) estándar establecido por la USEPA (United States Environmental Protection Agency) se observa en la siguiente Tabla 5:

Nombre Metal Pesado	Toxicidad	MCL (mg/L)
Arsénico	Manifestaciones en la piel, cáncer visceral, enfermedades vasculares.	0.05
Cadmio	Daño a riñones, trastornos renales, carcinógenos humanos.	0.01
Cromo	Cefalea o jaquecas, diarrea, náuseas, vómitos.	0.05
Cobre	Daño hepático, Enfermedad de Wilson, insomnio.	0.25
Níquel	Dermatitis, náuseas, asma crónica, tos, carcinógenos humanos.	0.20
Zinc	Depresión, letargo, problemas neurológicos y daño al sistema nervioso.	0.80
Plomo	Daño del sistema nervioso en fetos, daño a riñones, daño al sistema circulatorio y nervioso.	0.006
Mercurio	Artritis reumatoide, daño a los riñones. Daños al sistema circulatorio y nervioso.	0.00003

Tabla 5. MCL Estándares para metales pesados más peligrosos. (Babel y Kurniawan, 2003)

Se puede observar la cantidad en mg/L y toxicidad en la Tabla 1 la cual detalla el nivel máximo de contaminante de metales pesados indicando al mismo tiempo que este no debe ser superado. Además, se observa los peligros, reacciones y daños que estos generan si las cantidades no son reguladas.

Es posible en efluentes inorgánicos que contienen metales pesados que dichos contaminantes sean removidos mediante procesos convencionales de tratamiento. En el caso de remoción de metales pesados en aguas residuales industriales, éstas pueden ser tratadas mediante procesos químicos (precipitación química), coagulación, complejometría, carbón activado, intercambio



de iones, extracción de solvente, flotación con espuma y operación de membranas. (Journal of Multidisciplinary science studies, 2015).

#### **4.1 Presencia de metales pesados, fuente y presencia en aguas contaminadas**

Los metales presentan la característica de que difieren de otras sustancias tóxicas ya que no son creados y/o destruidos por los seres humanos, poseen alta densidad, masa, número atómico sobre 20 y son altamente tóxicos en pequeñas concentraciones (Pabón et al., 2020).

Las sustancias como los metales pesados y otros contaminantes se pueden presentar de manera natural como también producto de la actividad humana. En el caso de los metales pesados estos pueden ser analizados en actividades industriales como efluentes, plantas de fabricación de papel, empresas de fertilizantes, industrias de tintes y pigmentos además de industrias de galvanometría y empresas de limpieza de metales. De las empresas mencionadas anteriormente quienes liberan una mayor cantidad de metales pesados son las industrias de minería, creación de cuero y galvanoplastia.

#### **4.2 Características generales de metales pesados**

Además de su característica densidad y alta solubilidad, los metales pesados estos presentan una característica la cual es a bioacumularse. Bioacumulación significa un crecimiento en la concentración de una sustancia química en un organismo a lo largo del tiempo, en comparación con su concentración en el medio ambiente.

En bajas concentraciones, algunos de los metales pesados estimulan algunos procesos biológicos, pero en el umbral de concentración estos se vuelven tóxicos. Siendo no biodegradables, estos metales se acumulan en varios niveles tróficos a través de la cadena alimentaria y pueden causar problemas de salud humana, animal o vegetal. (Gautam, et al. 2016).

#### **4.3 Características específicas de metales pesados**

A continuación, se presentan características de los metales pesados presentes en el ecosistema acuático como también en el suelo.

##### **4.3.1 Cromo**

La palabra Cromo viene derivada del griego “Chroma” que significa color. Esto último se ve representado cuando el cromo al entrar en contacto con ciertos componentes este le produce un cambio de color. Los seres humanos están expuestos al cromo mediante el aire

(respiración), comida o beber ciertos líquidos. Por último, el contacto con la piel y el cromo es posible. (Baird, 2001).

#### **4.3.2 Mercurio**

El mercurio es considerado el metal pesado más tóxico y por ende el más efectivo para demostrar los peligros de dichos elementos. La mayor fuente de mercurio en el ambiente es la desgasificación natural de la corteza terrestre, ríos y océanos. (Baird, 2001).

#### **4.3.3 Cobre (Cu)**

Es un elemento muy abundante en la corteza terrestre en un rango de 24-55 gramos. En soluciones acuosas puede presentarse en la forma  $\text{Cu}^{2+}$  o  $\text{Cu}^{1+}$  y en condiciones redox como  $\text{Cu}^+$  tiene tendencia a concentrarse en los óxidos. En ausencia de materia orgánica el ion  $\text{Cu}^{2+}$  precipita como hidróxido al pH que suele encontrarse en el agua de corrientes fluviales, por otro lado, tiene mucha facilidad en la adsorción sobre partículas sólidas en suspensión (Kimura, 1985).

#### **4.3.4 Zinc (Zn)**

Es un metal abundante en la corteza terrestre al igual que el cobre, pero con una concentración media de 70 gramos, en aguas superficiales se encuentra en forma iónica, inorgánica o coloidal, siendo las más frecuentes  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{Zn}(\text{OH})^+$  y  $\text{ZnCl}_3^-$ , sus compuestos poco solubles tienen la capacidad de adsorber fuertemente sobre sedimentos y lodos en el fondo de cauces hídricos. (Llado, Jubert, 2011). El Zinc es principalmente utilizado en procesos industriales, también tiene aplicaciones en la agricultura como insecticidas entre otros (Adriano, 1986).

#### **4.3.5 Níquel**

El níquel está presente en el petróleo crudo como también en las operaciones de quema de petróleo o productos derivados del mismo petróleo. El níquel actúa como contaminante en el suelo debido a procesos como revestimiento de metales, combustión fósil, combustibles, el propio trabajo de minar níquel y la galvanoplastia. (Baird, 2001).

En el caso de que el níquel sea liberado por medio de plantas de quema de basuras o incineradores, las partículas pueden caer al suelo si existen ciertas precipitaciones. De igual

manera puede ocurrir que se depositen en cuerpos de aguas, ya sea por precipitaciones o descargas desde plantas de tratamiento. (Gautam, et al. 2016).

#### **4.3.6 Plomo**

El plomo es un mineral que persiste naturalmente y se encuentra combinado con otros elementos como por ejemplo el azufre ( $PbS$ ,  $PbSO_4$ ) y oxígeno ( $PbCO_3$ ). La incineración de residuos contribuye a una mayor cantidad de plomo disponible en las zonas urbanas.

El uso del plomo es variado y se incluye en almacenamiento de baterías, soldaduras, cojinetes, cubiertas de cables, municiones, plomería, pigmentos, calafateo y absorbentes de sonido y vibración. El plomo puede existir en varios estados de valencia:  $Pb(0)$ -metal,  $Pb(I)$ ,  $Pb(II)$  y  $Pb(IV)$  todos los cuales con la posible excepción de  $Pb(I)$  son de importancia ambiental. El plomo tiene una tendencia a concentrarse en la microcapa superficial del agua, especialmente cuando en la superficie presentaban materias orgánicas en sus films. El plomo es un veneno corporal acumulativo de carácter grave. Ingresa a cuerpos de agua por descargas industriales, mineras y de fundición o por disolución de antiguos plomos de plomería. (Gautam, et al. 2016).

#### **4.3.7 Arsénico**

El arsénico se encuentra comúnmente en todo el medio ambiente en una amplia gama de sustancias químicas, algunas especies que varían en toxicidad y movilidad. El arsénico se encuentra en una amplia variedad de productos químicos a través de todo el medio ambiente y puede ser fácilmente transformado por microbios, cambios en condiciones geoquímicas y otros procesos ambientales. El arsénico es un agente químico tóxico conocido por la Agencia de Protección Ambiental (EPA) y la Organización Mundial de la Salud (OMS) lo lista como un agente carcinógeno conocido. La toxicidad del arsénico depende del estado de oxidación, la forma química y la solubilidad de la sustancia química prolongados. (Baird, 2001).

#### **4.3.8 Cadmio**

El cadmio se distribuye en la corteza terrestre en una concentración promedio de alrededor de 0.1 mg/kg-0,2 mg/kg y se encuentra comúnmente asociado al zinc. La ruta principal de la exposición al cadmio para el segmento no fumador de la población es a través de los

alimentos. Incluso en la ausencia de contaminación ambiental el cadmio como constituyente traza está presente en la mayoría de los productos alimenticios. (Baird, 2001).

#### **4.3.9 Cobalto**

Las fuentes naturales de cobalto en el medio ambiente incluyen erupciones volcánicas, rocío de agua de mar e, inclusive, incendios forestales. Las fuentes antropogénicas de cobalto en la atmósfera incluyen el uso de maquinaria o energía a base de carbón, plantas de tratamiento e incineradores y gases de escape de los vehículos. Otros ejemplos son la actividad de extracción y producción de cobalto, la producción de aleaciones y productos químicos que contienen cobalto, efluentes de aguas residuales, urbano la escorrentía y la escorrentía agrícola son los principales contribuyentes antropogénicos de cobalto al medio acuático. (Baird, 2001).

#### **4.3.10 Hierro**

El hierro es uno de los principales constituyentes de la litosfera y comprende aproximadamente el 5 % (Ibañez, 2004). Se presenta mayoritariamente en efluentes de desechos municipales, particularmente en ciudades donde el hierro y el acero se fabrican. El hierro forma fácilmente complejos con sulfatos en los sedimentos de muchas aguas superficiales. La principal preocupación acerca de la presencia de hierro en el agua potable es su sabor desagradable. El sabor del hierro en el agua potable puede detectarse fácilmente incluso a bajas concentraciones de alrededor de 1,8 mg/L. El hierro tiene amplias aplicaciones industriales.

Los procesos humanos permiten la entrada de hierro al medio ambiente principalmente a través de efluentes de industrias como tinta, pintura y productos farmacéuticos, industrias mineras, procesamiento de minerales, industrias de galvanoplastia, plantas de procesamiento de zinc y acero. La presencia de Fe (II) en el agua conduce al crecimiento de bacterias de hierro que a su vez conduce a un color, sabor y olor indeseables al agua. El crecimiento abundante de bacterias de hierro en el agua conduce a una condición viscosa. Entonces el agua deja de ser apta para fines domésticos e industriales. (Gautam, et al. 2016).

#### 4.4 Generación de metales pesados de origen antropogénico

La mayoría de la generación de contaminantes metálicos son liberados por origen antrópico.(Walker *et al.* 2012). Actividades tales como: minería, fundición, metalmecánica, petroquímica, entre otros, son los principales actores en la actividad de generación de metales pesados. Estos procesos les siguen aquellos de carácter agrícola que involucran el uso de fertilizantes, plaguicidas e insecticidas los cuales son liberados por medio del agua hacia las aguas superficiales como también hacia las napas subterráneas. (Wasi et al. 2013)

En la siguiente Tabla 5 se detallan con mayor alcance las fuentes de emisión antropogénicas de metales pesados.

Metales Pesados	Fuentes de emisión
Cromo	Cromado, refinación de petróleo, industria de galvanoplastia, cuero, unidades de curtido, fabricación de textiles y procesamiento de pulpa.
Níquel	Galvanización, pintura y pólvora, unidades de procesamiento de baterías, fertilizantes super fosfatados y refinamiento de metales.
Plomo	Materiales a base de petróleo, pesticidas, gasolina con plomo y baterías móviles.
Zinc	Industrias del caucho, pinturas, tintes, conservantes de madera y ungüentos. Baterías, industrias de galvanoplastia, fertilizantes de fosfato, detergentes.
Cadmio	Productos de petróleo refinado, pigmentos de pintura, pesticidas, galvanizado de tuberías, plásticos, polivinilo y refineries de cobre.
Hierro	Partes o materiales de ingeniería y refinado de metales.
Aluminio	Industrias que preparan cableado aislado, creación de cerámica, autopartes, fosfato de aluminio y pesticidas.
Arsénico	Escape de automóviles/polvo industrial, conservantes de madera y tintes.
Mercurio	Bombilla eléctrica y/o de luz, conservantes de madera, curtido de cuero, ungüentos, termómetros, adhesivos y pinturas.
Cobre	Industria de galvanoplastia, industria del plástico, refinación de

	metales y emisiones industriales.
--	-----------------------------------

Tabla 6. Generación o procedencia de metales pesados por actividad humana. (Gautam, et al. 2016).

### 5. Peligros a corto y largo plazo para la salud de los organismos vivientes

La presencia de metales pesados en el medio ambiente, alimentos, el aumento de casos de intoxicación en seres humanos y/o animales ha aumentado la atención, y aún más, la preocupación de la necesidad de una eficiente regulación del manejo de los niveles de dichos metales contaminantes, esto se ve reflejado en un aumento de las operaciones humanas e industriales. A continuación, se presenta la Tabla 7 que detalla los peligros a la salud de los organismos:

<b>Metales Pesados</b>	<b>Efectos adversos, peligros y enfermedades producto de intoxicación por metales pesados</b>
Cromo	El envenenamiento por cromo produce úlceras, dermatitis alérgicas, cáncer al pulmón, necrosis de riñón, daño cerebral, muerte prematura, dificultades al riñón, problemas al feto, reduce la fertilidad. En el caso de ingesta de cromo hexavalente esta puede causar úlceras y perforaciones en el tabique, irritación de laringe y faringe, asma o bronquitis, edema y espasmos bronquiales. Las altas dosis de cromo son letales para animales y humanos.
Níquel	Produce varios tipos de cáncer en variados segmentos de los seres vivos. Altas concentraciones generan cáncer de pulmón, nariz y huesos. Además puede generar dermatitis, cefaleas, mareos, náuseas, vómitos, dolor de pecho como presión en el mismo, tos seca, hipoxemia, cianosis y una extrema debilidad en el cuerpo.
Plomo	Genera daños gastrointestinales, riñones y el sistema nervioso central. En casos de estudios en menores se ha observado un desarrollo limitado, bajo IQ, falta de concentración, hiperactividad y deterioro mental. En caso de adultos el envenenamiento produce lentitud, pérdida de memoria, náuseas, insomnio, anorexia, debilidad en las articulaciones, infertilidad, fallas de la síntesis hematológica, irritación y generación de tumores. Encefalopatía es uno de los casos más agudos por intoxicación por plomo que lleva a otros síntomas.
Cobre	Dolor abdominal, diarrea, vómito, ictericia. En algunos casos de altas dosis el cabello cambia de color y genera un cuadro agudo de fiebre. Dolor en el pecho, escalofríos, tos debilidad,

	dolor de cabeza o cefalea y sabor metálico en la boca. Inflamación en pulmones lo que se transforma en una disminución de la capacidad pulmonar. Anemia, sensación de ardor, demencia, movimientos involuntarios, insuficiencia renal e insuficiencia hepática.
Zinc	Irritación en la piel, vómitos, náuseas dolores estomacales. En concentraciones altas genera daño al hígado, dificultades respiratorias y desorden en el metabolismo proteico.
Cadmio	Produce neumonitis aguda, edema pulmonar la mayoría de los casos son letales. Gastroenteritis, problemas crónicos en los pulmones y riñones, fibrosis en los pulmones. Produce la enfermedad “itai-itai”. Dicha enfermedad se caracteriza por un dolor excruciante en los huesos.
Hierro	Aunque el hierro es esencial en la vida humana, en altas cantidades genera hemocromatosis lo que resulta en daños a los tejidos. Los síntomas de envenenamiento son vómitos, diarrea y daños intestinales.
Arsénico	Afecta a la membrana mucosa del sistema respiratorio. Tos convulsiva, enfermedades a los pulmones. Daños al páncreas, anormalidad en los cromosomas. En las discusiones se ha concluido que la exposición al arsénico es de carácter mutagénico y cancerígeno. Generador de la Enfermedad de Bowen.
Mercurio	El mercurio en cantidades altas afecta al sistema nervioso central. El metilmercurio es el derivado más peligroso y afecta directamente a niños o niñas generando en casos graves retraso mental. Además se incluyen daños en la división celular, daño a riñones, falla pulmonar y dolor de pecho y disnea.

Tabla 7. Efectos adversos en la salud de seres humanos y organismos producto de envenenamiento por metales pesados. (Gautam, et al. 2016).

### **5.1 Daños a la salud y ecosistema por metales incluidos en lodos mal depurados durante el proceso de tratamiento de aguas residuales.**

Las aguas residuales pueden contener altos niveles de nutrientes como el nitrógeno y fósforo que en ciertas formas puede ser tóxico para peces e invertebrados en concentraciones muy bajas (por ejemplo, amoníaco) o eso puede crear condiciones insanas en el ambiente de recepción. Las algas presentes en los lodos o en las aguas tratadas, pueden producir las toxinas, su muerte y consumo por las bacterias pueden agotar el oxígeno en el agua y sofocar

los pescados y la otra vida acuática (Castells, 2012). Cuando se recibe una descarga de los ríos a los lagos o a los mares bajos, los nutrientes agregados pueden causar eutroficación severa perdiendo muchos peces sensibles a la limpieza del agua. El retiro del nitrógeno o del fósforo de las aguas residuales se puede alcanzar mediante la precipitación química o biológica. Los lodos deben ser estabilizados correctamente para la reducción de la presencia de patógenos, eliminar los olores desagradables y reducir o eliminar su potencial de putrefacción. Los medios de estabilización más eficaces para eliminar el desarrollo de estas condiciones son: la reducción biológica del contenido de materia volátil; la oxidación química de la materia volátil; la adición de agentes químicos para hacer el lodo inadecuado para la supervivencia de microorganismos y la aplicación de calor con el objetivo de esterilizar el lodo.

Las técnicas de estabilización de lodos más recurridas son:

- 1) La digestión anaerobia: En este proceso se propicia la degradación de la materia orgánica contenida en él, en ausencia de oxígeno molecular. En el proceso de digestión anaerobia, la materia orgánica contenida en la mezcla de lodos primarios y secundarios se convierte en metano ( $\text{CH}_4$ ) y dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) principalmente (Rivera, 2013).
- 2) La digestión aerobia: Se emplea generalmente en plantas de tratamiento con capacidad inferior a 20,000  $\text{m}^3$  /día, sin embargo, en algunas ocasiones se ha empleado en plantas con mayor capacidad. Es similar al proceso de lodos activados. Conforme se agota el suministro de sustrato disponible (alimento), los microorganismos empiezan a consumir su propio protoplasma (respiración endógena) para obtener la energía necesaria para las reacciones de mantenimiento celular. El tejido celular se oxida a dióxido de carbono, amoníaco y agua por vía aerobia. En la práctica sólo se puede oxidar entre 75 y 80 % del tejido celular, puesto que el resto está formado por componentes orgánicos no biodegradables (Galvis, 2013).

## **6. Métodos y técnicas de remediación junto con sus aplicaciones**

Los métodos químicos para la depuración de agentes contaminantes, en específico metales pesados, en aguas residuales presentan una base concreta y son una tecnología madura que permite una implementación efectiva (Qasem, et al. 2021).



## 6.1 Precipitación Química

Es el método más utilizado en las plantas de tratamiento debido a su efectividad, costo y su madurez. Consiste en el cambio de la estructura de los iones de los metales disueltos para que estos sean transformados en partículas sólidas las cuales facilitan la sedimentación.

El coagulante hace que los iones del metal precipitan hacia el fondo donde luego son retirados de forma manual. El proceso para que los iones puedan precipitar se logra mediante un cambio de pH, de potencial de electro-oxidación o una coprecipitación (Qasem, et al. 2021).

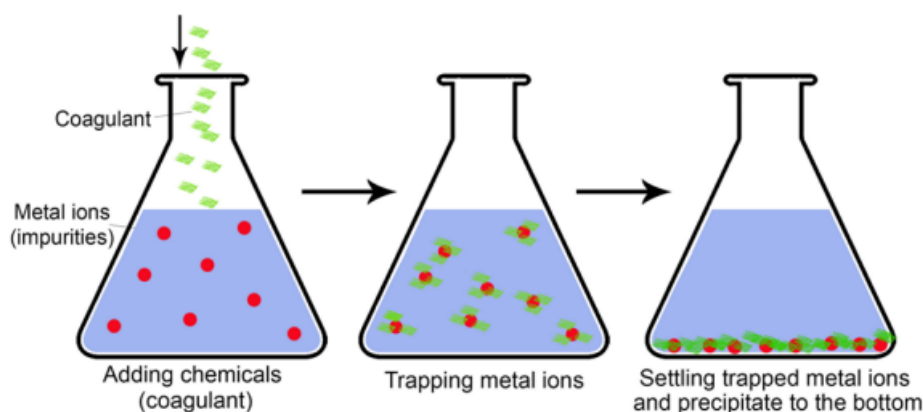


Figura 5. Proceso de precipitación química (Qasem, et al. 2021).

## 6.2 Coagulación y floculación

La coagulación consiste en la desestabilización de los coloides por medio de la neutralización de las fuerzas que los mantienen separados. Por otro lado, la floculación es un método que se enfoca en la aglomeración de las partículas que fueron desestabilizadas.

Para la coagulación los coagulantes más comunes son el aluminio, sulfato ferroso y cloruro férrico. Dichos coagulantes son utilizados para neutralizar la carga de iones.

En caso de la floculación esta une las partículas adyacentes para formar un gran aglomerado de estas, esto se logra con la ayuda de una sustancia floculante. Estas sustancias pueden ser cloruro de poli aluminio, sulfato poli férrico o poliácridamida. Cabe mencionar que las sustancias floculantes resultan, en su mayoría, ser de origen no natural y no biodegradables. (Qasem, et al. 2021).

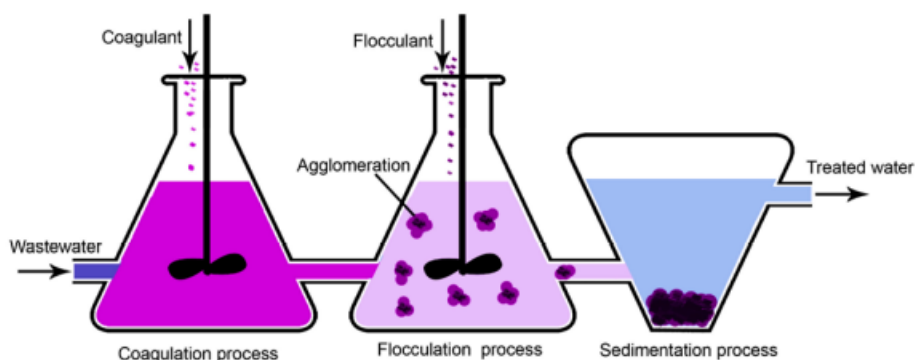


Figura 6. Proceso de tratamiento de Coagulación y Floculación (Qasem, et al. 2021).

### 6.3 Flotación

El método de flotación es principalmente usado para remover una cantidad variada de iones de metales presentes. Existen tres tipos de flotación las cuales son: flotación por aire disuelto, flotación por iones y flotación por precipitación.

En el caso de la flotación por aire disuelto, el aire (o gas) es alimentado hacia el agua residual para generar microburbujas que puede atrapar los iones metálicos, creando aglomerados de baja densidad lo que permite la elevación de los flóculos a través del agua residual. Al subir los flóculos, estos pueden ser fácilmente retirados manualmente.

En la flotación por iones se basa específicamente en la hidrofobicidad de los metales por medio del uso de surfactantes. Esto último permite que los metales que tienen una hidrofobia, sean retirados por medio de burbujas de aire. Por último, la flotación por precipitación es un proceso simple que puede ser completado en un margen corto de tiempo. Consiste en un precipitado químico que permite la creación de microburbujas en el ambiente. (Qasem, et al. 2021).

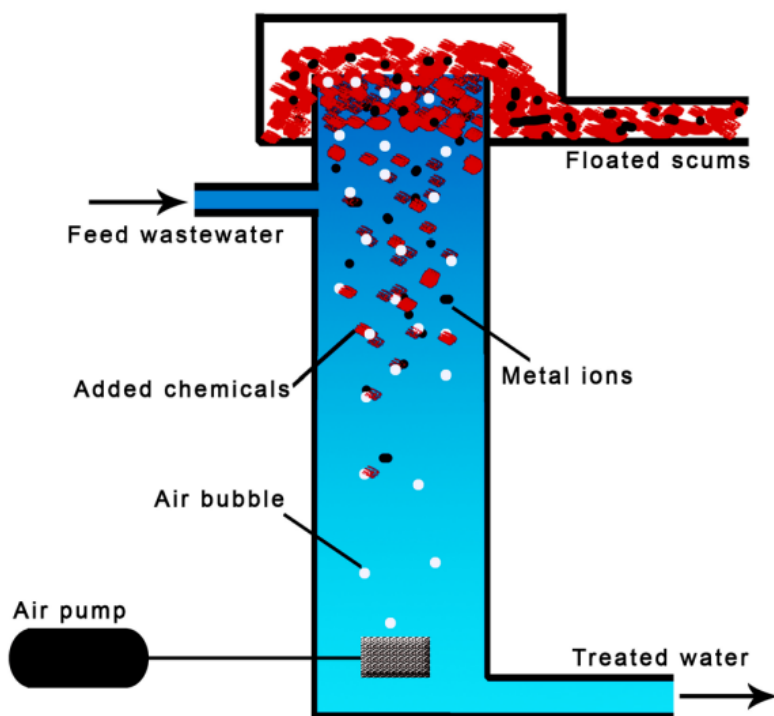


Figura 7. Proceso de flotación. (Qasem, et al. 2021).

#### 6.4 Proceso de intercambio de iones

El xantato de almidón insoluble se fabrica a partir de almidón reticulado comercial mediante la reacción de hidróxido de sodio y disulfuro de carbono.

Es utilizado, o bien se comporta, como un intercambiador de iones el cual remueve metales pesados que se encuentran en las aguas contaminadas, y cambia dichos metales por sodio y magnesio. El xantato de almidón insoluble (ISX por sus siglas en inglés), se utiliza comúnmente en procesos u operaciones de flujo continuo y en forma de sólidos para tratamientos de lotes. Para que dicho tratamiento tenga efecto, debe ser introducido al agua contaminada con pH mayor o igual a 3. Por último, el pH del agua en tratamiento o lodos debe ser elevado a 7 para una remoción de metales pesados satisfactoria.

#### 6.5 Proceso de Adsorción

La adsorción se considera un método fisicoquímico con una gran importancia debido a sus aplicaciones de tipo industrial y de laboratorio. La adsorción como proceso se da cuando un sólido es utilizado para seleccionar y depurar una sustancia en específico (en este caso metales pesados) que se encuentra en un medio acuoso. Otra definición puede ser: Proceso

físicoquímico que puede incluir un gas o sólido en medio soluble. Dichas sustancias son absorbidas mediante un material externo que apoya el proceso produciendo que el gas o el sólido en medio acuoso se depositen en la superficie del material adsorbente.

En el caso de la absorción las sustancias que son adsorbidas se denominan adsorbato, mientras que el material encargado de adsorber dichas sustancias se llama adsorbente.

La adsorción se diferencia de la absorción dada la razón que esta última se enfoca en la acumulación de la sustancia absorbida en todo el volumen del absorbente, no solamente en la superficie.

Se identifican dos tipos de adsorción:

- Adsorción Física o fisorción
- Adsorción Química o quimisorción

Las diferencias entre ambas se encuentran en las interacciones entre el adsorbente y el adsorbato. La física se centra en interacciones de Van der Waals, por otra parte, la química tiende a generar o asemejar enlaces químicos. (Tubert y Talanquer, 1997). Lo anterior da lugar a entalpías de adsorción diferentes: Alrededor de -20 kJ/mol para el proceso físico y -200 kJ/mol para un proceso químico (Atkins, 1991).

La cantidad de material adsorbido en un sistema depende de la temperatura y la presión del adsorbato. Si la temperatura se mantiene constante durante el proceso, el grado de adsorción puede describirse como función de la presión o la concentración y generar lo que se conoce como isoterma de adsorción (Tubert y Talanquer, 1997).

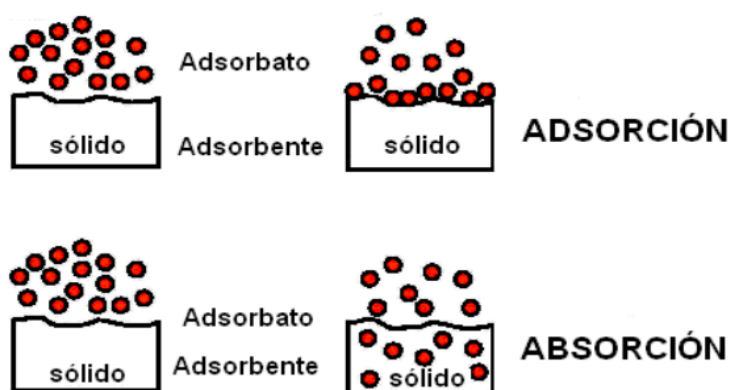


Figura 8. Diferencia de adsorción y absorción, (Moreno 2005)

## **6.6 Uso de arcillas como proceso de adsorción**

Bhattacharya y Sen Gupta (2008) han encontrado que los minerales de arcilla caolinita y montmorillonita pueden eficientemente remover Fe (III), Co (II) y Ni (II) desde medios acuosos. La Zeolita también se presenta como una opción a utilizar dado sus capacidades y características. Resulta que es un mineral catalogado como silicato de alúmina hidratado altamente poroso que contiene una estructura tridimensional cristalina. Además, tienen capacidad alta de intercambio de iones, superficies específicas relativamente grandes y bajo costo. (Pavan, et al. 2017).

Usman, Kuzyakov y Stahr (2005) indican en su experimentación el desempeño de los minerales de arcilla y su eficiencia en la remoción de contaminantes en suelos afectados por lodos.

## **6.7 Remediación de suelos con lodos tratados mediante métodos biológicos**

Además de las técnicas de remediación físico, químicas y fisicoquímicas, existen varios otros métodos de diferente medio, pero con los mismos resultados los cuales son depurar metales pesados. A estos métodos se les denomina métodos biológicos y son definidos a continuación.

### **6.7.1 Fitorremediación**

También se le conoce como la “biorremediación botánica”. Dicha práctica se ha convertido en la más estudiada y utilizada en el último tiempo gracias a sus resultados satisfactorios en la remoción de contaminantes, ya sean en ambientes terrestres y/o acuáticos. Dicha técnica funciona cuando cierta cantidad de plantas, previamente seleccionadas por su capacidad de remediación, se colectan para luego ser ubicadas en un sitio que se encuentre contaminado, en ese caso por metales pesados, pero su objetivo es amplio y pueden abarcar más que solo la limpieza de metales pesados (Pavan, et al 2016). Estudios demuestran que la fitorremediación se alza por sobre las técnicas de ingeniería y/o de uso de microorganismos.

### **6.7.2 Fitoextracción**

Existen diversas técnicas de fitorremediación dependiendo del mecanismo de remediación, y la fitoextracción es una de ellas. Es un método de depuración biológico que se caracteriza por

utilizar plantas con ciertas propiedades para absorber, trasladar y guardar desechos tóxicos desde una matriz de suelo hacia su raíz y tallo. Luego de que las plantas han depurado el terreno estas son retiradas para ser almacenadas, incineradas o bien reutilizada para compostaje por el valor de los metales existentes en ellas.

Se considera la mejor aproximación para depurar un suelo afectado con algún contaminante de tipo inorgánico sin afectar la estructura de este y actividad agrícola gracias a la absorción del contaminante por medio de sus raíces y luego a las diferentes partes de la planta. La Agencia de Protección Ambiental (EPA por sus siglas en inglés) ha reportado varios estudios de fitoextracción en lodos, suelos contaminados y sedimentos con resultados muy positivos en la remoción de metales pesados. (Rosas Peña, 2008).

Algunos estudios y experimentaciones realizadas sobre fitoextracción (Kumar et al, 1995) detallan el siguiente experimento. Se adicionaron concentraciones sobre el suelo a tratar de 2 mg/L de cadmio, 50 mg/L de cromo, 3.5 mg/L de cobre, 100 mg/L de níquel, 500 mg/L de plomo y 100 mg/L de zinc, concluyendo que las cantidades no fueron tóxicas para la planta “Mostaza india” (*brassica juncea*). (Rosas Peña, 2008).

### **6.7.3 Fitoestabilización**

Es la técnica para retener o inmovilizar metales pesados de cierto lugar ya sean en suelo como en lugares que presenten napas subterráneas. El método funciona a través de las raíces de la planta y puede ocurrir como absorción o acumulación, absorción por la raíz o precipitación. La fitoestabilización funciona como un inmovilizador de contaminantes y previene su movimiento hacia napas subterráneas o incluso al aire.

### **6.7.4 Rizofiltración**

Este método se concentra en el uso de plantas acuáticas como terrestres, las cuales tienen la capacidad de captar contaminantes desde sus raíces en medios acuosos. Dicho proceso puede aplicarse en o sobre efluentes industriales, drenajes de minería y lodos o suelo contaminado con metales pesados (Khan et al, 2000). Si bien puede captar contaminantes y su utilidad se ha demostrado, este proceso presenta una desventaja que es la alta acumulación de compuestos de alta toxicidad en sus raíces. El paso siguiente a esto es el recolectar las plantas para luego ser incineradas, sus cenizas deben ser llevadas a rellenos sanitarios donde el contaminante o compuesto tóxico es regresado nuevamente al suelo. Aun con esta desventaja

se han propuesto diversos métodos para la reutilización de los contaminantes (metales pesados en este caso) luego de la incineración o incluso antes.

Se ha realizado experimentación con la fontanera (*Myriophyllum Spicatum*) y Wang et al, 1996 detecta una acumulación de plomo en sus raíces con concentraciones de 1 a 16 mg/L con una concentración residual por debajo de 0,004 mg/L. Por parte del cobre este fue ubicado en una acumulación entre 1 y 16 mg/L, con un valor residual de menos de 0,01 mg/L. En el caso del Níquel se encontraron acumulaciones entre los valores de 1 a 16 mg/L con valores residuales de 0,01 mg/L. (Rosas Peña, 2008).

Las plantas utilizadas para este proceso resultan ser muy atractivas debido a su gran capacidad de acumulación, alta tolerancia a contaminantes, fácil manejo, bajo costo de mantenimiento y una menor cantidad de residuos secundarios. Las macrófitas que producen gran cantidad de biomasa radicular son las más aconsejables para este tipo de tratamiento (Reeves et al., 2000). Esta técnica se diferencia de la fitorremediación por el método de cómo son empleadas las raíces ya que se cultivan en invernaderos con sus raíces en el agua, que en este caso presenta contaminación de metales pesados.

## **Problemática**

En las instalaciones de tratamiento de agua, se producen subproductos, como los lodos, que podrían tener potencial para ser reutilizados si sus niveles de contaminación no representan un riesgo para la salud humana y el entorno ambiental. Sin embargo, en muchas plantas de tratamiento, estos lodos no se reutilizan, principalmente debido a sus altas concentraciones de metales pesados. En este contexto, nuestro enfoque se centrará en proponer un proceso de reutilización de lodos en la planta "Explotaciones Sanitarias S.A." para reducir las concentraciones de cobre y zinc presentes en sus lodos.

## **Objetivo general**

Evaluar los métodos destinados a la remoción de metales, en particular el cobre y el zinc, presentes en los lodos resultantes del proceso de purificación de aguas contaminadas. Este estudio se centrará en el caso de la empresa "Explotaciones Sanitarias S.A.", ubicada en la comuna de Quilicura, enfocándonos en los procedimientos implementados en su planta.

## **Objetivos específicos**

- I. Caracterizar el funcionamiento y composición de los lodos de la planta modelo “Explotaciones Sanitarias S.A”.
- II. Revisar y analizar métodos químicos, físicos y biológicos factibles para la remoción de metales pesados, en específico para Cobre y Zinc presentes en los lodos residuales.
- III. Generar una propuesta económica en base al método más eficiente escogido para la reducción de niveles de Cobre y Zinc en los lodos residuales de la planta “Explotaciones Sanitarias S.A”.

## **Marco Metodológico**

### **1. Funcionamiento y composición de los lodos en la planta modelo**

Se llevaron a cabo tres visitas a las instalaciones de la empresa Explotaciones Sanitarias S.A. La primera de estas visitas tuvo lugar en agosto de 2022, donde nos reunimos con el químico encargado de la planta. Durante esta visita, realizamos un recorrido exhaustivo por la planta de tratamiento, documentando el entorno mediante la captura de fotografías y recopilando información detallada acerca de los procesos que se desarrollan en la empresa.

En la segunda visita realizada en octubre de 2022, se recopilaron datos significativos a través del funcionario encargado del laboratorio y análisis químicos realizados en la empresa. Estos análisis se llevaron a cabo a lo largo de 2021 hasta finales de 2022 en colaboración con el laboratorio SGS, que proporcionó informes detallados siguiendo una metodología específica. En el caso de la medición de metales pesados, la determinación se basó en análisis de base seca y siguió el siguiente protocolo:

Para Arsénico, Selenio y Antimonio, se utilizó la metodología I-ENV-LAB-116, basada en EPA 3050, SM 3114 B Ed.23, 2017.

Para otros elementos, se aplicó la metodología I-ENV-LAB-116, basada en EPA 3050B, y la metodología I-ENV-LAB-501, basada en EPA 6010B, SM 3120B Ed.23, 2017 (ICP).

Para medir la humedad, se siguió la metodología I-ENV-LAB-102, basada en el método de Análisis de Suelos INIA Serie N°34, 2006.



Estas metodologías de análisis proporcionaron información valiosa sobre la composición química de los elementos presentes en la planta de tratamiento, permitiendo una evaluación precisa de la situación.

La tercera visita se llevó a cabo en diciembre de 2022, se obtuvieron datos relevantes relacionados con los costos asociados al funcionamiento y la disposición de residuos de la Planta "Explotaciones Sanitarias S.A". Estos datos corresponden a los gastos registrados para las fechas del 31 de octubre de 2022 y el 2 de diciembre de 2022.

Con base en los resultados proporcionados en los informes emitidos por SGS, se generó la Tabla 8 para organizar la información de los muestreos efectuados en la medición de metales presentes en los lodos secos de la planta "Explotaciones Sanitarias S.A." Estos muestreos abarcan de marzo de 2021 hasta agosto de 2022. Además, presenta los promedios de concentración de los metales, así como sus valores máximos y mínimos, junto con la desviación estándar correspondiente. Luego procedimos a la creación de gráficos con el propósito de verificar y evaluar las concentraciones de metales pesados presentes en las muestras de lodos secos. Estos gráficos se desarrollaron de forma individual para cada uno de los metales analizados, permitiendo un análisis detallado de la situación en la planta.

Esta información servirá como base para la búsqueda de una solución orientada a la reducción de metales, en particular del cobre y zinc, presentes en los lodos de la planta de tratamiento de agua de Explotaciones Sanitarias S.A.

## **2. Evaluación de métodos aplicables para la remoción de contaminantes en lodos**

Para llevar a cabo la revisión bibliográfica, se examinaron un total de 64 recursos, que incluyeron archivos de proyectos, revistas científicas o de investigación, así como proyectos de tesis relacionados con los objetivos requeridos. Este proceso se realizó con el propósito de complementar y analizar detenidamente la mejor opción en términos de las necesidades de la planta y los recursos presupuestarios disponibles.

De acuerdo a lo anterior se desarrollará un paso a paso (o filtro) de cómo se van a descartar aquellos recursos que no contemplen o estén estrechamente relacionados a la búsqueda de la elaboración de un proceso de depuración que permita la eliminación efectiva de contaminantes metálicos en lodos resultantes de plantas de tratamiento. De esta manera se

asegura un método único, creativo y amigable con el medioambiente que no genere ningún tipo de emisión al momento de trabajar los lodos para su disposición final.

## **2.1 Selección según tecnología a aplicar**

Para esta sección se considerarán las características de remoción encontradas en los 64 recursos analizados. La(s) tecnología(s) seleccionada debe cumplir con los siguientes requisitos: i) Ser sustentables y/o amigables con el medioambiente; ii) Tener una capacidad de remoción igual o superior al 90% de capacidad de remoción de contaminantes (sean de aguas de tratamiento, lodos, ambos, entre otros); iii) Esta sección está destinada a descartar o no artículos que utilicen agentes, procesos o elementos químicos para depurar los contaminantes pesados. Esto permite la eliminación de cualquier tipo de recurso, examen de tesis, artículo, papers entre otros que utilicen métodos químicos y/o químico-físico; iv) Los procesos deben tener una facilidad amplia de aplicación para la planta modelo es decir, deben ajustarse a las características de la planta de tratamientos a la cual se desea trabajar; v) Debe presentar un proceso que sea libre de emisiones contaminantes o de cualquier tipo de contaminación para la planta o hacia sus exteriores; vi) La selección debe ser de carácter innovador y creativo para la planta, con soluciones óptimas con la habilidad de presentar un atractivo hacia la planta de tratamiento y hacia la población; y vii) Por último, la solución que se encuentre en los 64 artículos analizados debe ser capaz de tener la característica de ser apoyado o aceptar un método de fitorremediación específico. De esta manera, se espera alcanzar los estándares de remoción que exige la normativa para emplear los lodos como material fertilizante ya sea para usos agrícolas o de recreación como el cuidado de parques, plazas o bien la creación de alguna de las mencionadas.

Las características necesarias mencionadas anteriormente permiten un efecto de filtro perfecto para buscar, analizar y adaptar diferentes tipos de textos académicos o de revistas científicas al proyecto de tesis, logrando una efectividad al momento de decidir cuál artículo será el que refuerce los conocimientos impartidos aquí.

## **2.2 Evaluación cualitativa de la metodología seleccionada mediante análisis FODA**

Mediante un análisis FODA (Fortalezas, Oportunidades, Debilidades, Amenazas) testeamos cualitativamente la viabilidad de la metodología a proponer para disminuir la contaminación

de lodos. Para esto, examinamos un conjunto de 17 documentos específicos centrados en la metodología que se pretende implementar. Este análisis nos proporciona una evaluación integral de los posibles métodos a implementar o de mayor interés. A continuación, se detalla cómo se llevó a cabo:

1. Comenzamos por identificar las características clave de los métodos de fitorremediación que consideramos relevantes para nuestro proyecto de eliminación de contaminantes en aguas.
2. Para estas técnicas, analizamos en profundidad sus fortalezas en términos de rendimiento en la remoción de contaminantes. Esto implicó considerar su eficacia, capacidad de acumulación de metales, y su potencial para reducir la concentración de contaminantes en el agua.
3. También examinamos las debilidades y limitaciones, específicamente en lo que respecta a su aplicabilidad en nuestro contexto particular. Esto incluyó factores como la adaptación de las plantas a las condiciones locales y la disponibilidad de especies adecuadas.
4. Buscamos oportunidades para incorporar prácticas sustentables en los procesos. Esto involucró la consideración de aspectos como la minimización de residuos, la reutilización de biomasa vegetal y la integración con otros sistemas de tratamiento.
5. Finalmente, evaluamos las amenazas potenciales que podrían surgir al considerar métodos más invasivos o alternativos de descontaminación. Esto nos permitió identificar posibles riesgos ambientales, económicos o de salud.

Durante todo este proceso, recopilamos datos específicos relacionados con cada aspecto evaluado en el análisis FODA para las técnicas de fitorremediación. Estos datos fueron detallados y organizados para su revisión y toma de decisiones, en Tablas separadas para cada técnica de interés de fitorremediación disponible.

En resumen, el análisis FODA nos proporcionó una sólida base de información para respaldar nuestra elección de la técnica más apropiada para nuestro proyecto de eliminación de contaminantes. Al evaluar las fortalezas, debilidades, oportunidades y amenazas, pudimos tomar una decisión informada que se alinea con nuestros objetivos y condiciones específicas del sitio.

### **2.3 Selección de propuesta final**

Se realizaron análisis de 64 documentos para dar base a una propuesta tentativa, se optó por el artículo de Usman et al (2005), como la guía principal para la selección del proceso y método de depuración con minerales de arcillas.

La selección del sistema de apoyo para el proceso de depuración de aguas residuales implica la implementación de un proceso de adsorción utilizando minerales arcillosos con el objetivo de reducir la presencia de metales pesados en los lodos residuales generados durante las etapas de tratamiento primario y secundario en la planta de tratamiento de aguas. Además, se llevará a cabo un proceso de pulido adicional que consiste en la fitorremediación. La elección de este método se basará en una investigación exhaustiva de documentos, archivos y artículos científicos que propongan soluciones concretas para nuestro caso específico.

### **3. Evaluación económica de manejo y gastos actuales de los lodos de la PTA**

Para la selección apropiada de la tecnología a implementar en la planta de tratamiento, se han considerado los costos asociados a su implementación. En este sentido, se llevaron a cabo estimaciones de los gastos actuales relacionados con la gestión de lodos, teniendo en cuenta factores como el transporte, el volumen mensual y el contenido de humedad del lodo, proyectando esta información a un período de 3 años. Esta recopilación de datos se realizó a través de una solicitud formal a la planta, y fueron proporcionados en una reunión presencial por el químico a cargo, lo que permitió obtener un informe exhaustivo sobre la gestión actual de los lodos. Además, se realizó una estimación de los costos de retiro de lodos de la empresa utilizando las facturas correspondientes a los retiros con destino al relleno sanitario. Esta evaluación proporcionó una visión más precisa de los costos reales asociados a la planta.

Para una toma de decisiones informada, se llevaron a cabo comparaciones de los valores asociados a cada método propuesto, teniendo en cuenta sus respectivas propiedades y los precios de mercado. Por último, se incorporaron los costos relacionados con la fitorremediación, junto con los beneficios que esta técnica podría aportar a la planta de tratamiento.

## 4. Resultados

### 4.1 Datos obtenidos desde la planta modelo de tratamiento de agua. (OE1)

El diseño de la planta modelo se basa en la utilización de una laguna aireada, que consiste en un cuerpo de agua artificial donde se promueve la oxidación biológica de las aguas residuales mediante la aireación. Este enfoque se implementa en la planta Explotaciones Sanitarias S.A, y se ilustra a continuación a través de las siguientes figuras:



Figura 9: entrada de las aguas al pretratamiento. (Recuperado: Carreño. C, 2022)

Los procesos iniciales de la planta de tratamiento se ubican en la entrada de la instalación con el propósito de eliminar residuos sólidos, arenas y grasas. Estos elementos, si no se separan en esta etapa, podrían causar daños mecánicos a los equipos utilizados en las fases subsiguientes del tratamiento, lo que resultaría en una disminución de la eficacia en el proceso de purificación del agua.



Figura 10: Tornillo del pretratamiento. (Recuperado: Carreño. C, 2022)

Este componente forma parte del equipo de pretratamiento y su función es la eliminación de los sólidos de mayor tamaño que ingresan a la planta de Explotaciones Sanitarias S.A, también conocidos como material grueso. Esto se logra a través de un mecanismo en el cual un tornillo gira sobre su eje, impulsando así que los materiales sólidos asciendan por el interior del tubo, para su posterior eliminación.



Figura 11: Motor blowers. (Recuperado: Carreño. C, 2022)

El soplador de aire es un dispositivo que oxigena las aguas residuales, facilitando así la biodegradación de componentes contaminantes. Este motor genera una potente presión y un



flujo de aire eficiente, lo que permite la agitación de las partículas contaminantes, como las arenas o las grasas, para su posterior eliminación del proceso de tratamiento.



Figura 12: Eliminación de arenas. (Recuperado: Carreño. C, 2022)

Contenedor destinado a albergar las partículas contaminantes de pequeño tamaño que se recogen durante la fase del pretratamiento, se pueden eliminar hasta un 75% de las partículas suspendidas.



Figura 13: Eliminación de grasas. (Recuperado: Carreño. C, 2022)

Este contenedor almacena las grasas que se retiran durante la fase de pretratamiento de las aguas residuales.



Figura 14: Ingreso a las lagunas aireadas. (Recuperado: Carreño. C, 2022)

Después de la eliminación de los contaminantes iniciales durante la etapa de pretratamiento, las aguas residuales avanzan al proceso de tratamiento en las lagunas aireadas. Este flujo se inicia al pasar a través de las tuberías que se muestran en la Figura 13, y posteriormente se continúa con la fase de purificación de estas aguas.



Figura 15: Lagunas aireadas (Recuperado: Carreño. C, 2022)

El agua se somete a un tratamiento en las piscinas de aireación, también conocidas como reactores biológicos, donde microorganismos se encargan de degradar la materia orgánica presente en el agua.





Figura 16 & 17: lagunas de sedimentación. (Recuperado: Carreño. C, 2022)

El agua fluye hacia las piscinas de sedimentación, durante este proceso, los sólidos se sedimentan, permitiendo que el agua continúe su recorrido por rebalse hacia la cámara de contacto.



Figura 18 & 19: Bombas de succión de Lodos. (Recuperado: Carreño. C, 2022)

El lodo sedimentado se extrae utilizando bombas de succión y se dirige hacia las piscinas de acumulación de lodo. Desde allí, se realiza su trasvase al estanque de alimentación de la centrífuga.



Figura 20: Aireador tornado equipado con motor de 3 Hp. (Recuperado: Carreño. C, 2022)

Diseñados para crear una corriente en sentido opuesto al flujo de descarga, evitando que los sólidos presentes en el agua sin tratar pasen a las aguas ya tratadas.



Figura 21: Piscina de espesamiento de los lodos. (Recuperado: Carreño. C, 2022)

Piscina donde entran los lodos succionados por las bombas desde las lagunas aireadas para ser tratados y secados posteriormente.





Figura 22: Piscina acumuladora de lodos. (Recuperado: Carreño. C, 2022)

Lugar donde se acumula el lodo líquido de la planta de tratamiento, para eliminar sus líquidos.



Figura 23: Lodos sólidos. (Recuperado: Carreño. C, 2022)

Lodo extraído de la piscina acumuladora, es trasvasado al estanque de alimentación de la centrífuga (decanter) En esta centrífuga se separa el sólido del líquido, donde el líquido es llamado clarificado, el cual se descarta en las lagunas de aireación.



Figura 24: Secado de lodos (Recuperado: Carreño. C, 2022)

El sólido generado que sale del decantador con una humedad aproximada de 75% de humedad es llevado hasta la cancha de secado donde se termina de secar, en verano el lodo queda con humedad de hasta un 10 % y en invierno un 60% aproximadamente, pero todo depende del clima, lo máximo permitido para disponer en relleno sanitario es de 70%, en promedio.



Figura 25: Humedal los esteros de Quilicura. (Recuperado: Carreño. C, 2022)

Lugar donde se retiene y almacena el agua disponible para consumo, producción y sostenimiento de la vida silvestre, posee una baja profundidad y es donde la planta envía el 60% de las aguas ya tratadas, ya que el 40% restante lo vende a la empresa minera Anglo American.

A continuación, se presenta la Tabla 8, en la cual se han destacado los niveles de los metales, sus promedio, máximos y mínimos. Además, se incluyen gráficos que reflejan los resultados de los análisis realizados en la planta modelo de Explotaciones Sanitarias S.A, que se centraron en la detección de metales pesados, la medición del pH y la evaluación de los niveles de humedad presentes en los lodos de la planta. Los gráficos proporcionan una representación visual de los datos críticos que superan los límites permitidos para el proceso de compostaje.

Fecha muestreo	Arsénico	Cadmio	Zinc	Cobre	Mercurio	Níquel	Plomo	Selenio
3/5/2021	9.31	2.84	1656.70	1414.62	0.01	43.73	44.53	0.63
5/14/2021	19.81	3.29	2391.89	1730.42	1.63	41.97	53.98	0.21
8/13/2021	15.74	2.04	2896.31	1572.78	0.63	38.88	50.40	0.20
11/10/2021	13.94	2.81	2359.94	1448.29	0.19	39.21	45.53	0.46
5/17/2022	20.01	1.40	2605.70	1432.50	0.60	43.20	60.30	0.03
8/12/2022	13.38	2.69	2209.28	1249.23	7.16	42.04	61.47	0.11
Promedio	13.171	2.153	2017.117	1263.977	1.460	35.576	45.173	0.236
Desviación	286.308	2.293	866092.218	131937.039	37.308	20.484	259.759	0.316
Máximo	20.01	3.29	2896.31	1730.42	7.16	43.73	61.47	0.63
Mínimo	0.01	1.40	1656.70	1249.23	0.01	38.88	44.53	0.01

Tabla 8: Resultados de los informes entregados por el laboratorio SGS a la planta modelo “Explotaciones Sanitarias S.A” (Elaboración propia, 2022).

Se identificaron varios metales pesados en los lodos de la planta modelo, que incluyen arsénico, cadmio, zinc, cobre, mercurio, níquel, plomo y selenio. Entre ellos, se destacan el cobre y el zinc debido a sus concentraciones más significativas en relación a los límites permitidos para el compostaje.

A continuación, se recalcan los gráficos del cobre y el zinc debido a sus concentraciones más significativas en relación a los límites permitidos para el compostaje, que abarcan desde marzo de 2021 hasta agosto de 2022. Estos gráficos proporcionan una representación visual de la evolución de los niveles de estos metales en los lodos de la planta durante ese período.

## Zinc

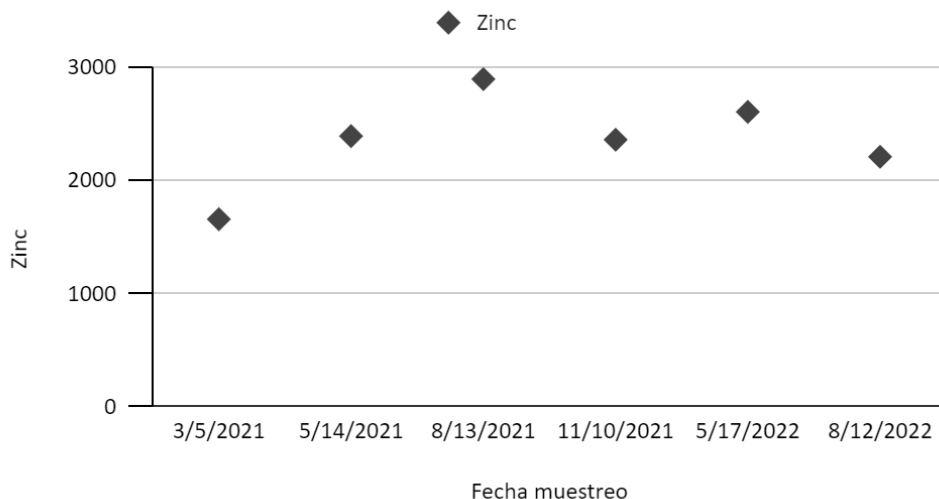


Gráfico N°1: Muestréos de concentraciones del zinc realizados por el Laboratorio SGS. (Elaboración propia, en base a informes de la planta Explotaciones Sanitarias S.A)

En el gráfico, se puede deducir que la planta está recibiendo una mayor carga de efluentes que contienen el metal pesado zinc. En el año 2022, se observa una concentración de zinc de 2209,28 mg/Kg esto podría interpretarse como un indicio de que los procesos de depuración implementados por la planta se han vuelto más eficaces en la eliminación de este contaminante en comparación con años anteriores. Sin embargo, sus niveles de concentración tienden a ser elevados para las normativas de compostaje. Su presencia en las aguas residuales puede ser problemática debido a sus posibles efectos adversos en el medio ambiente y la salud humana. Por lo tanto, las PTAR desempeñan un papel fundamental en la eliminación y reducción de la concentración de zinc en las aguas residuales antes de su liberación al medio ambiente. El zinc puede ingresar al sistema de aguas residuales a través de diversas fuentes, como desechos industriales, aguas de proceso, productos químicos domésticos y vertidos de aguas pluviales contaminadas.

## Cobre

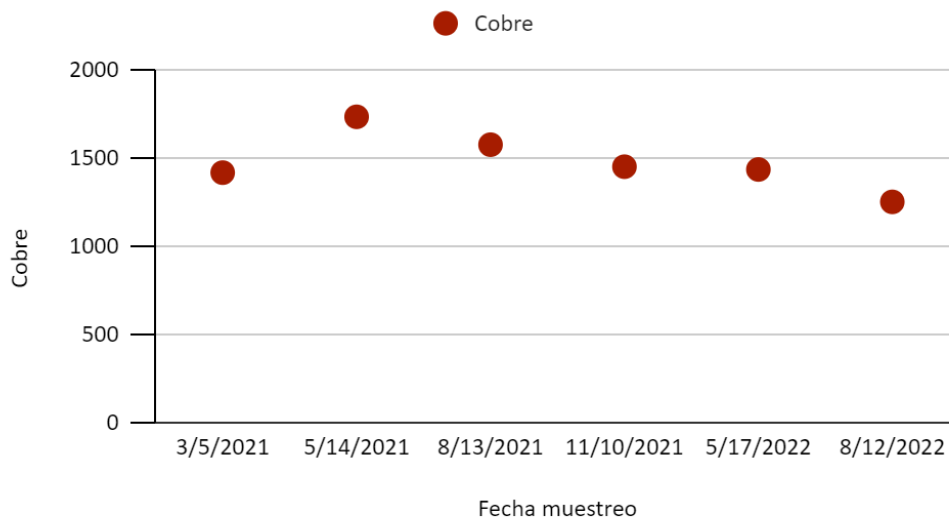


Gráfico N°2: Muestreos de las concentraciones del cobre realizados por el Laboratorio SGS. (Elaboración propia, en base a informes de la planta Explotaciones Sanitarias S.A)

Según los resultados del gráfico, se pueden observar concentraciones significativas de cobre en comparación con la Norma Chilena 2880. La cantidad más baja detectada de cobre en las muestras fue de 1249,23 mg/kg. Sin embargo, es importante destacar que las concentraciones de cobre parecen mantenerse relativamente estables desde el año 2021 hasta el año 2022, con una disminución gradual. Esto puede deberse en parte a la posibilidad de que, en el transcurso de ese período, la planta haya recibido menos efluentes en sus lagunas aireadas, lo que contribuyó a la reducción de las concentraciones de cobre, pero estas siguen sobrepasando el límite de 1000 mg/kg de la NCH 2880 para el compostaje. Sabemos que las principales fuentes emisoras de estos metales son las actividades industriales y mineras, por la generación de emisiones gaseosas, material particulado y la que hoy nos invoca aguas residuales.

A continuación, se entregan gráficos con relación a los metales pesados más elevados de la planta (zinc y cobre) vs humedad y pH:



### Zinc y Cobre

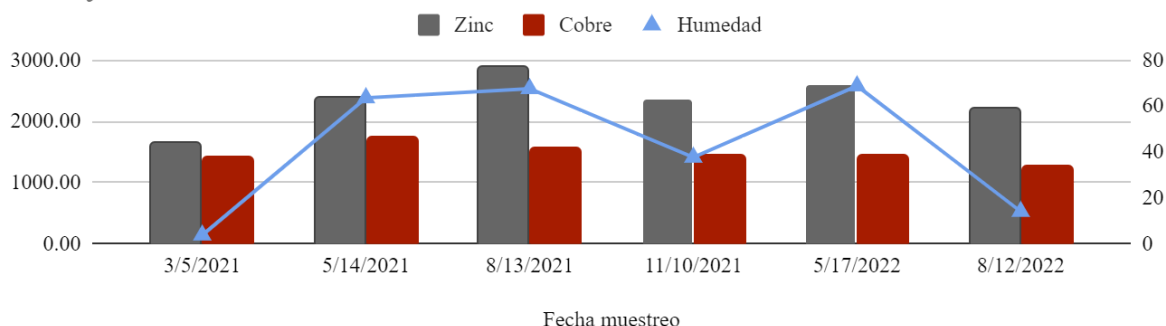


Gráfico N°3: Representación del comportamiento del cobre y el zinc con presencia de humedad en lodos secos. (Elaboración propia, en base a informes de la planta Explotaciones Sanitarias S.A)

Al analizar el gráfico anterior que muestra la relación entre la humedad y el tiempo, se puede notar un patrón consistente durante las épocas de verano, la humedad tiende a disminuir, mientras que en las estaciones más húmedas, como el invierno, la humedad aumenta. Además, se observa un incremento constante en los niveles de humedad desde el año 2021 hasta el año 2022. Un hallazgo interesante es que existe una compensación entre la humedad y las concentraciones de zinc y cobre. A medida que la humedad aumenta, también lo hacen las concentraciones de estos dos metales en el ambiente. No obstante, es importante notar que las concentraciones de cobre y zinc muestran una diferencia leve a lo largo del tiempo, lo que sugiere una cierta estabilidad en sus niveles a pesar de las variaciones estacionales en la humedad.

### Zinc y Cobre

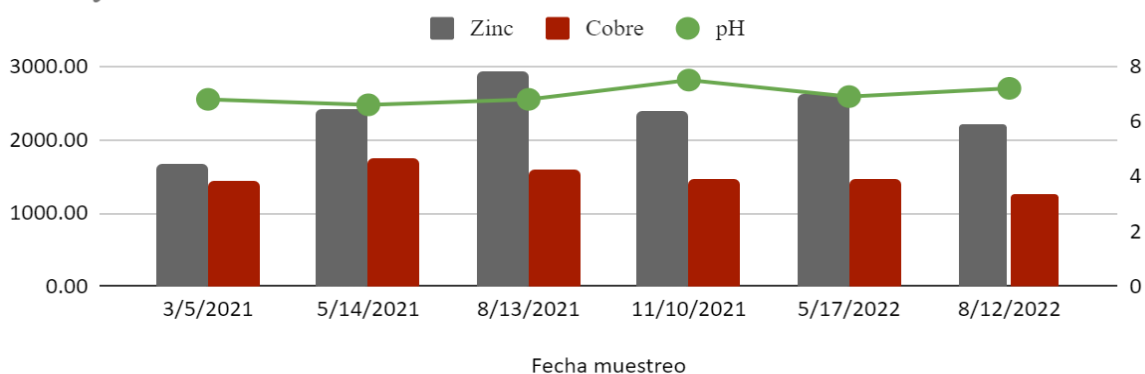


Gráfico N°4: Representación gráfica del comportamiento del zinc y el cobre en presencia del pH en la planta modelo. (Elaboración propia, en base a informes de la planta Explotaciones Sanitarias S.A)

Se puede observar que a lo largo del tiempo, el pH en la planta de tratamiento "Explotaciones Sanitarias SA" ha mantenido una estabilidad que se correlaciona con los niveles de metales pesados y otros productos presentes en los lodos de la planta. El pH se mantiene en un rango



cercano a la neutralidad, sin llegar a ser alcalino. El valor más elevado se registró en noviembre de 2021, alcanzando un pH de 7.5. Sin embargo, en la actualidad, en el año 2022, el pH ha disminuido, llegando a un valor mínimo de 6,9. Es importante destacar que para lograr una biodisponibilidad asimilable con el cobre y el zinc, se requiere un pH más ácido que el observado en este caso. Este hallazgo sugiere la necesidad de monitorear y ajustar el pH en la planta de tratamiento para optimizar la remoción y la biodisponibilidad de estos metales pesados.

## **4.2 Métodos a utilizar en la planta de tratamiento (OE2)**

### **4.2.1 Análisis métodos físicos, químicos y biológicos factibles para la remoción de metales pesados, en específico para Cobre y Zinc presentes en lodos residuales.**

El objetivo principal de la investigación es la implementación de metodologías sustentables de remoción y amigables con el ambiente para el tratamiento de los lodos de la planta de tratamientos de Explotaciones Sanitarias.

Como primera alternativa se evaluó la precipitación química, dado los altos niveles de remoción de contaminantes. Sin embargo, se buscó una solución alternativa a esta metodología, pues ésta presenta un alto costo ambiental y de mantenimiento (Huisman, 2006). La mayor desventaja que presenta la remoción química es que la adición de productos químicos en el proceso de precipitación puede introducir sustancias químicas peligrosas en el agua tratada. Si no se gestionan adecuadamente, estos productos químicos pueden representar un riesgo para la salud humana y el medio ambiente (Qasem, et al. 2021). En resumen, aunque la precipitación química puede ser efectiva en la eliminación de algunos contaminantes en el tratamiento de aguas residuales, presenta desafíos en términos de generación de lodos, costos, impacto ambiental y limitaciones en la eliminación de ciertos contaminantes (Mandel, 2013), lo que nos permite descartarla como técnica principal para tratar los lodos de la planta.

Con base en la información recopilada, se abre la posibilidad de emplear un método no químico. En este contexto se destaca la adsorción, empleando arcilla mineralizada como método de depuración, a diferencia de los procesos de remoción química. Este enfoque

resulta atractivo para su estudio e implementación debido a sus ventajas en términos de costos económicos y de mantenimiento reducidos.

Como texto guía se utilizó el artículo de Usman, et al (2005) el cual utilizó arcilla de Na-Bentonita, Ca-Bentonita y Zeolita. La investigación realizada por este grupo de investigación demostró las ventajas del método de compuestos arcillosos para la depuración de metales pesados desde el suelo o lodo.

Los resultados indicaron que las formas intercambiables de todos los metales pesados en experimentación fueron reducidas por incubación en todos los tratamientos con mineral de arcilla. En el estudio se realizó un seguimiento en el tiempo, donde durante las primeras 3 semanas de incubación, las formas intercambiables de los metales pesados se vieron disminuidas para todas las condiciones donde los compuestos intercambiables y la zeolita estuvieron presente, en rangos de: 21% para el Zn, 38% para el Cd, 23% para el Cu y un 46% para el Ni comparados con los datos iniciales. Luego de los días, estas disminuciones de la forma intercambiable cambiaron poco e incluso se mantuvo constante hasta el final de la incubación. Los resultados se pueden observar en la Figura 25 que contiene los gráficos extraídos desde “Effect of Clay Minerals on Immobilization of Heavy Metals and Microbial Activity in a Sewage Sludge-Contaminated Soil”. (Usman, et al. 2005).

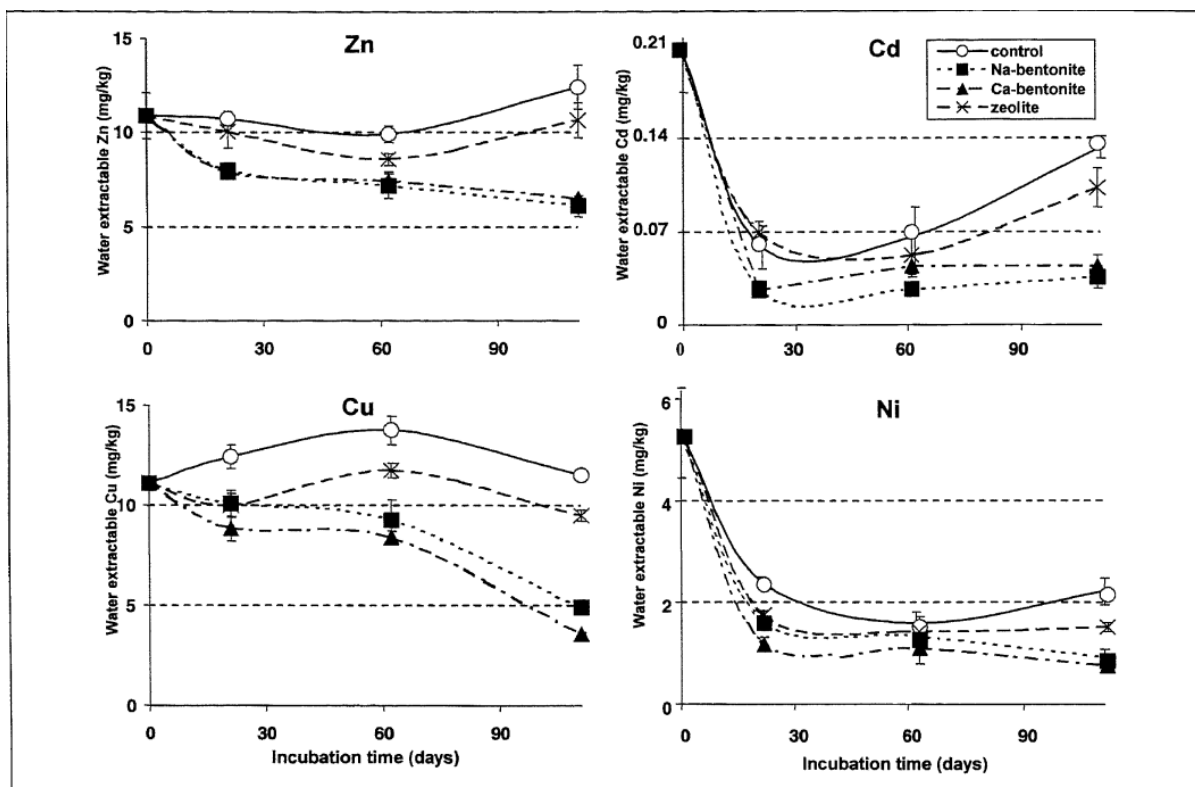


Figura 26. Cambios en los metales pesados extraíbles en agua después de la adición de minerales arcillosos durante el experimento. (Usman, et al. 2005).

Las conclusiones de la experimentación indican que el uso de Na-bentonita y Ca-bentonita sería beneficioso como herramienta para la remoción de la extractabilidad y posible toxicidad de los metales pesados hallados en suelos contaminados por lodos de procesos de depuración de aguas. De esta manera, los suelos contaminados con metales pesados podrían ser remediados por la adición de Na-bentonita y Ca-bentonita (Usman, et al. 2005). Estos resultados podrían ser mejorados si al término de la adición de dichos minerales de arcilla al proceso de depuración en una planta de tratamiento de aguas, se le agrega un procedimiento biológico del tipo de fitorremediación. Es por lo que se ha optado por la búsqueda de procedimientos biológicos capaces de depurar lodos contaminados en suelos afectados. De estos procesos se investigaron 2 tipos de fitorremediación de tipo biológica, los cuales son: Fitoextracción y Rizofiltración.

#### 4.2.2 Análisis FODA para procesos de fitorremediación

Se presentan análisis FODA de procesos de fitorremediación con el objetivo de identificar la mejor opción para las necesidades de la planta de tratamiento:

## Fitoextracción

<p><b><u>Fortalezas</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>*Técnica eficiente, sustentable y biológica.</li> <li>*Bajo costo de aplicación y mantención.</li> <li>*Proceso de fitorremediación adecuado para la depuración de suelos y/o lodos contaminados.</li> </ul>	<p><b><u>Debilidades</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>*Requiere preparación previa y no puede ser utilizado como proceso primario de depuración</li> <li>*Su proceso de depuración es lento en comparación a procesos convencionales químicos, físicos y fisicoquímicos.</li> <li>*Posible necesidad de buscar una determinada planta para cada metal pesado a tratar.</li> <li>*La eficacia de la fitoextracción puede variar según la planta, el tipo de contaminante y las condiciones del suelo, lo que puede dificultar la aplicación generalizada.</li> <li>*Proceso <i>in situ</i>.</li> </ul>
<p><b><u>Oportunidades</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>*La creciente conciencia ambiental abre oportunidades para la adopción de tecnologías sostenibles.</li> <li>*Posibilidad de investigación y desarrollo.</li> </ul>	<p><b><u>Amenazas</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>*Todos los procesos químicos, físicos y fisicoquímicos resultan ser más rápidos en la depuración y la efectividad es mayor, aunque aumenta el costo.</li> <li>*Condiciones climáticas adversas podrían afectar negativamente su eficacia.</li> </ul>

Tabla 9. Análisis FODA de fitoextracción. Creación propia.

### **Rizofiltración**

<p><b><u>Fortalezas</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>*Técnica eficiente y sustentable, utiliza las raíces de las plantas para filtrar contaminantes, ofreciendo una eficaz eliminación de sustancias nocivas en el agua.</li> <li>*Bajo costo de aplicación y mantención.</li> <li>*Proceso de fitorremediación con propiedades <i>in situ</i> y <i>ex situ</i> que permite que el movimiento de lodos tratados no sea de manera directa hacia el suelo.</li> <li>*Gran variedad de plantas que van desde terrestres hasta acuáticas.</li> <li>*Puede ser especialmente efectiva en áreas con presencia de humedad, aprovechando las condiciones favorables para el crecimiento de las plantas.</li> </ul>	<p><b><u>Debilidades</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>*Requiere preparación previa y no puede ser utilizado como proceso primario de depuración, sólo como procedimiento de pulido para una mayor absorción.</li> <li>*Su proceso de depuración es lento comparado con procesos convencionales químicos, físicos y fisicoquímicos.</li> <li>*Se requiere un cuidado constante para asegurar la salud de las plantas y mantener la eficacia.</li> <li>*Debido a su alta captación de metales pesados o contaminantes se requiere disponer de la planta utilizada e incinerarla, sus cenizas se consideran residuos peligrosos.</li> </ul>
<p><b><u>Oportunidades</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>*Aumento de interés por procesos más sustentables y de carácter biológico.</li> <li>*Proceso atractivo a la vista.</li> <li>*Posibilidad de recuperar los metales pesados extraídos para otros procesos.</li> </ul>	<p><b><u>Amenazas</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>*Todos los procesos químicos, físicos y fisicoquímicos resultan ser más rápidos en la depuración y la efectividad es mayor, aunque aumenta el costo.</li> <li>*Eventos climáticos extremos pueden afectar la capacidad de las plantas para llevar a cabo la rizofiltración de manera efectiva.</li> </ul>

Tabla 10. Análisis FODA de rizofiltración. Creación propia 2022.

Ambos métodos, fitoextracción y rizofiltración, presentan fortalezas y debilidades distintivas en la remediación ambiental (Ghosh & Singh, 2005). No obstante, la rizofiltración emerge como una opción destacada gracias a sus ventajas, que incluyen:

1. Eficiencia en la purificación acuática: La rizofiltración se destaca en la eliminación de contaminantes presentes en el agua, siendo particularmente eficaz en ambientes acuáticos y suelos saturados.
2. Menor velocidad de extracción compensada: Aunque puede ser más lenta que algunos métodos químicos, la rizofiltración ofrece una eficacia continua y sostenible, compensando la velocidad con su bajo costo operativo y menor impacto ambiental.
3. Adaptabilidad a condiciones húmedas: La capacidad de operar en áreas húmedas y con alta humedad la hace adecuada para entornos donde la fitoextracción podría no ser tan efectiva.
4. Eficacia en la absorción de metales pesados: Las raíces de las plantas utilizadas en la rizofiltración tienen la capacidad única de absorber y acumular metales pesados, incluidos el zinc y el cobre, presentes en los lodos. Esto se debe a los complejos procesos de intercambio iónico y absorción selectiva que ocurren en las raíces (López. S & Tomellini. G, 2009).

Estas ventajas hacen que la rizofiltración sea una opción eficaz para la eliminación de metales pesados, proporcionando soluciones sostenibles y económicamente viables en la gestión de lodos de tratamientos de aguas contaminadas.

### **4.3 Propuestas económicas en relación con método de arcillas y rizofiltración (OE3)**

#### **4.3.1 Manejo actual de los lodos en la PTA.**

La línea de lodos en el proceso de tratamiento de la PTAS ESA comienza en la fase biológica y manejo, extrayendo el lodo sedimentado. Posteriormente, se somete a deshidratación mecánica mediante un decantador centrífugo, reduciendo la humedad y el volumen del lodo. El equipo actual tiene una capacidad máxima de 20 m<sup>3</sup>/h y capacidad másica de 300 kg/h, cumpliendo con los requisitos de producción. Antes de la deshidratación, hay un estanque de espesamiento gravitacional de 1200m<sup>3</sup> para reducir la humedad y actuar como compensador

entre la laguna y el deshidratador. Para garantizar una homogeneización adecuada, hay otro estanque de lodos de 27m<sup>3</sup>. A continuación, se presenta un diagrama de flujo de los lodos:

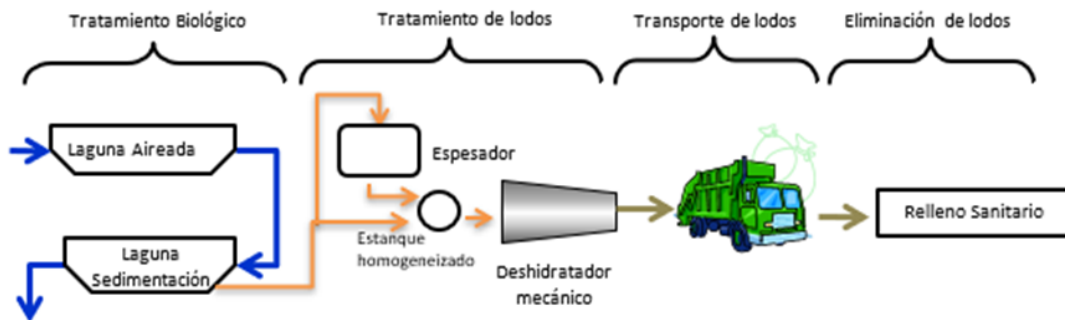


Figura 27: Diagrama de flujo de la línea de Lodos en la planta modelo (Elaboración propia, 2022).



Figura 28: Unidad de deshidratación (Recuperado: Carreño. C, 2022).

El proceso de deshidratación se lleva a cabo en un Decanter Centrífugo Westfalia, Modelo UCD 305-00-02, serie 8004-497, operando a una velocidad máxima de 4500 rpm, generando hasta 3400 fuerzas g y procesando hasta 20 litros/hora. Esta unidad consta de dos bombas de tornillo con una capacidad de 1-11 (m<sup>3</sup>/h) y una potencia de 7,5KW, utilizadas alternadamente para elevar el lodo al equipo de deshidratación.

#### 4.3.2 Gastos operacionales actuales de los lodos en la PTA.

El tratamiento de lodos conlleva costos significativos. A continuación, se detallan los gastos operativos y de disposición de residuos para la Planta "Explotaciones Sanitarias S.A." durante los periodos de marzo a agosto y de septiembre a febrero.

SUCURSAL Explotaciones Sanitarias S.A.			
Cantidad	Detalle	Precio Unitario (CLP)	Total, periodo otoño/ invierno (CLP)
388,26 ton.	Toneladas recepcionadas en la Planta RS Gersa	\$61.665	\$23.942.052
27 viajes	Transporte a Planta RS Gersa	\$262.761	\$7.094.547
Descuento (CLP)			\$0
Monto neto (CLP)			\$31.036.599
IVA 19%			\$5.896.954
Monto Total (CLP)			\$36.933.553
Observaciones periodo Facturación: Según la información proporcionada por la empresa, los costos operativos más elevados se registran durante los meses de marzo a agosto. Este aumento se debe a que el lodo tiende a alcanzar mayor peso producto de una alta humedad.			

Tabla 11. Cálculo de gastos Planta periodo marzo a septiembre "Explotaciones Sanitarias". Creación propia, 2022.

SUCURSAL Explotaciones Sanitarias S.A. Año 2022			
Cantidad	Detalle	Precio Unitario (CLP)	Total, periodo primavera/ verano (CLP)



163,71 ton.	Toneladas recepcionadas en la Planta RS Gersa	\$62.661	\$10.258.233
15 viajes	Transporte a planta RS Gersa	\$267.007	\$4.005.105
Descuento (CLP)			\$0
Monto neto (CLP)			\$14.263.338
IVA 19%			\$2.710.034
Monto Total (CLP)			\$16.973.372
Observaciones periodo Facturación: La información entregada por la empresa indica que el periodo de facturación para los meses de septiembre a febrero tuvo un costo operacional menor debido a que en este periodo, el lodo tiende a tener un menor peso, ya que la humedad es más baja.			

Tabla 12. Cálculo de gastos Planta periodo octubre a febrero “Explotaciones Sanitarias”. Creación propia, 2022.

Según la información de las Tablas 11 y 12, se estima que la planta de tratamiento de aguas incurre en considerables gastos operacionales, destacando especialmente en el período de marzo a agosto con un gasto aproximado de \$36,933,553 pesos con impuestos. Durante el periodo de septiembre a febrero, los gastos operacionales son aproximadamente de \$16,973,372 sumando un total anual de \$53,906,925 con impuestos. Frente a esta situación, considerando las características del lodo resultante y su conversión en un fertilizante de alta eficiencia con la reducción de metales pesados, proponemos la comercialización del 15% del lodo. Esta estrategia tiene el potencial de mitigar los costos operacionales en un 15%, brindando a Explotaciones Sanitarias S.A. ingresos adicionales. La Tabla 13 muestra los posibles ingresos al comercializar este producto.

Explotaciones Sanitarias S.A.
-------------------------------

Cantidad	Detalle	Precio Unitario (CLP)	Total, ventas anuales (CLP)
82,7955	Toneladas propuestas para la venta anual	\$82.070	\$6.795.027
Descuento (CLP)			\$0
Monto neto (CLP)			\$6.795.027
IVA 19%			\$1.291.055
Monto Total (CLP)			\$8.086.082
<p>Observaciones a la propuesta: Para alcanzar el objetivo de reducir los costos operacionales en un 15%, se propone gestionar y comercializar el lodo fertilizante el que se ha obtenido una vez realizados todos los procesos de eliminación de materiales pesados, obteniendo un producto de alta calidad que finalmente sea considerado como una alternativa premium a las existentes de manera que los productores agrícolas se sientan seguros de su calidad y pureza.</p>			

Tabla 13. Cálculo de ventas anual del material lodo fertilizante “Explotaciones Sanitarias”. Creación propia. 2022

#### 4.3.3 Costos de los métodos a utilizar para la disminución de metales pesados en los lodos.

- **Método Na-Bentonita y Ca-Bentonita**

Este método propone sustituir la adsorción con carbón activado por la adsorción con arcilla mineralizada, que demuestran un potencial y eficacia comparables (Castro, 2019). Estos minerales, como la Caolinita, Montmorillonita y Zeolita, son arcillas abundantes en la tierra con capacidad catalítica para neutralizar contaminantes, especialmente metales pesados. Las arcillas pertenecen a la familia de los aluminosilicatos y presentan estructuras en capas que favorecen la adsorción (Pawar, Lalhmunsiana, 2016). Este enfoque no solo es eficiente, sino

también sostenible, utilizando materiales naturales para la remoción de contaminantes. Estudios experimentales respaldan el atractivo comportamiento de estos minerales de arcilla como adsorbentes en la eliminación de metales pesados tóxicos.

Se exploran grupos minerales, específicamente la bentonita sódica, bentonita cálcica y zeolita, como adsorbentes con el propósito de depurar metales pesados como Zinc, Cadmio, Cobre y Níquel. La búsqueda de los adsorbentes más eficaces se basa en el estudio de Usman. Este estudio aborda la caracterización de un suelo contaminado con lodos, revelando una distribución de tamaño de partículas con un 42% de arena, 40% limo, y arcilla del 18%. Las propiedades químicas del suelo incluyen un pH de 7.0, 8.9% de  $\text{CaCO}_3$ , 13.3% de C orgánico y 1.7% de N total, la muestra de suelo para experimentación tiene altos contenidos de metales pesados, como Zinc  $4500 \text{ mg/kg}^{-1}$ , Cadmio  $77 \text{ mg/kg}^{-1}$ , Cobre  $2000 \text{ mg/kg}^{-1}$ , Níquel  $442 \text{ mg/kg}^{-1}$  y Plomo  $1650 \text{ mg/kg}^{-1}$  (Usman et al., 2005). Estos datos sirven como base para evaluar la propuesta, basada en condiciones similares a las utilizadas por Usman, que lograron rendimientos cercanos al 23% para el cobre y el 21% para el zinc (Usman et al, 2005).

En la siguiente sección se pueden observar los valores que ofrece el mercado con relación a la Na-Bentonita y Ca-Bentonita.

Valores de Mercado de Ca-bentonita					
Producto	Kilogramos	Valor Neto (CLP)	% IVA	Valor IVA (CLP)	Valor bruto (CLP)
Ca-bentonita	1 kg	\$8,400	19%	\$1,596	\$9,996
Ca-bentonita	25 kg	\$52,500	19%	\$9,975	\$62,475

Tabla 14. Cálculo de precio mercado para la Ca-Bentonita. Creación propia en base a información por parte de la Empresa Productos Químicos. 2022

La Ca-Bentonita se caracteriza por su contenido significativo de calcio y su estructura molecular única. Físicamente, se presenta en forma de polvo con partículas finas y una apariencia terrosa. Su olor es inodoro, y su punto de fusión se estima alrededor de  $1450^\circ\text{C}$ . Con una gravedad específica que varía entre 2.45 y 2.55, la Ca-Bentonita exhibe una alta densidad aparente compactada de  $1.2 \text{ g/cm}^3$  y una densidad aparente no compacta de  $1 \text{ g/cm}^3$ . En suspensión acuosa al 5%, su pH oscila entre 4.7 y 10. Además, muestra una solubilidad

baja, siendo insoluble en agua y formando coloides en suspensión. La capacidad de neutralización de ácido cítrico se mide en miliequivalentes por cada 100 gramos, y en el caso de la Ca-Bentonita, este valor es inferior a 250. La humedad de la Ca-Bentonita se mantiene en niveles bajos, generalmente por debajo del 15%.

Valores de Mercado de Na-bentonita					
Producto	Kilogramo	Valor Neto (CLP)	% IVA	Valor IVA (CLP)	Valor bruto (CLP)
Na-bentonita	1 kg	\$3,980	19%	\$756	\$4,736
Na-bentonita	25 kg	\$24,900	19%	\$4,731	\$29,631

Tabla 15. Cálculo de precio mercado para la Na-Bentonita. Creación propia en base a información por parte de la Empresa Productos Químicos. 2022.

Na-Bentonita, se distingue por su contenido predominante de sodio. Al igual que la Ca-Bentonita, se presenta en forma de polvo, inodoro y con un punto de fusión aproximado de 1450°C. Sin embargo, sus propiedades varían en términos de gravedad específica, que también está entre 2.45 y 2.55, y su pH en suspensión acuosa al 5%, que se mantiene en un rango de 8 a 10. La densidad aparente compactada de la Na-Bentonita es de 1.2 g/cm<sup>3</sup>, similar a la Ca-Bentonita. Al igual que su contraparte cálcica, la Na-Bentonita es insoluble en agua y forma coloides en suspensión. Su capacidad de neutralización de ácido cítrico es también inferior a 250 milímetros por cada 100 gramos, y su contenido de humedad suele ser menor al 15%.

En resumen, ambas arcillas, Ca-Bentonita y Na-Bentonita, exhiben propiedades fisicoquímicas que las hacen valiosas en diversas aplicaciones, desde la purificación de agua hasta la remoción de metales pesados en procesos industriales. En términos económicos, la arcilla bentonita, ya sea en su forma cálcica o sódica, presenta ventajas significativas. En primer lugar, su disponibilidad abundante en la naturaleza reduce los costos asociados con la adquisición de este material. Además, la arcilla bentonita tiene la capacidad única de adsorber metales pesados de manera efectiva debido a su estructura porosa y su capacidad para intercambiar iones, lo que se traduce en una reducción considerable de los costos operativos.

- **Método de Rizofiltración**

Se utiliza finalmente como método de fitorremediación la rizofiltración al interior de la planta de tratamiento en un terreno dispuesto para aquello, donde la plantas puedan coexistir con los

lodos de manera óptima y al mismo tiempo de manera operacional sin que deba interrumpir con las tareas regulares de la planta de tratamiento misma.

Esta solución es una opción rentable en comparación con algunos métodos convencionales de tratamiento de lodos pre-tratados y posteriormente tratados. Además, las plantas que se utilizan en este proceso pueden adaptarse a diferentes condiciones ambientales, lo que hace que la rizofiltración sea una solución versátil, siendo activos muy codiciados para la planta de tratamiento.

Nombre científico	Nombre común	Precio unitario CLP/planta crecimiento completo	Número de plantas a utilizar (unidades/kilo)
<i>"Lupinus"</i>	Lupino	3000 CLP	13 unidades/kilo
<i>"Viola Odorata"</i>	Violeta de jardín	2000 CLP	13 unidades/kilo

Tabla 16. Nombres, valores y cantidad de plantas a utilizar para el terreno. Creación propia 2022.

La rizofiltración, aprovechando plantas como el "Lupinus" y la "Viola Odorata", se revela como una elección económicamente eficiente. Con un costo unitario de 3000 CLP por planta de "Lupinus" y 2000 CLP por planta de "Viola Odorata", y considerando que cada kilo de lodo alberga aproximadamente 13 unidades de estas plantas, el resultado es una opción altamente rentable.

## 5. Discusión

La situación planteada evidencia un desafío significativo para la planta de tratamiento "Explotaciones Sanitarias S.A." en su camino hacia la sostenibilidad y la reutilización efectiva de lodos. La presencia creciente de metales pesados, durante los últimos años, especialmente cobre (Cu) y zinc (Zn) (esta afirmación se respalda con los datos de la Tabla 8), ha generado una limitación sustancial en la capacidad de reutilización de los lodos generados por la planta. A pesar de estos altos valores, la planta no ha desarrollado las tecnologías necesarias para poder remediar los contaminantes presentes en los lodos, para su posible reutilización. El desarrollo de tecnologías de remediación, como adsorción con arcillas especializadas o la fitorremediación podría ofrecer estrategias viables para abordar este desafío. La inversión en estas soluciones no solo mejoraría la calidad de los lodos, sino que también abriría oportunidades para su reutilización en aplicaciones beneficiosas, como la agricultura.

La implementación de técnicas de remoción de contaminantes en los lodos de la planta de tratamiento no solo mejorará la calidad del efluente, sino que también resultará en una reducción significativa de los costos operativos de la planta. Se sugiere la adopción de dos enfoques complementarios: la adición de arcilla al flujo de lodos para la eliminación de contaminantes pesados, y la creación de un área de rizofiltración dentro de la planta para una purificación más precisa. Por las características que presenta la planta de tratamiento “Explotaciones Sanitarias S.A”, se ha decidido recomendar el proceso de depuración con minerales arcillosos Na-Bentonita y Ca-Bentonita a modo de aplicación primaria para la extracción de metales pesados contaminantes en los lodos producidos por la planta. De acuerdo con lo analizado en el documento de Usman et al. (2005) este proceso permite la depuración de metales pesados al mismo nivel que un proceso de carbón activado, pero a menor costo de aplicación y mantención. Otro punto a favor, gracias a la investigación de Usman, et al. (2005), de este proceso es que se enfoca en los metales pesados más altos que presenta la planta en sus lodos residuales. Además, otra ventaja de emplear arcillas como adsorbente para la remoción de metales pesados son la elevada capacidad de adsorción e intercambio de iones, baja permeabilidad, capacidad de hinchamiento, estabilidad química y elevada área superficial (R. Zhu, Q. Chen, 2016). Además, el mecanismo de adsorción que tienen las arcillas, es operado para remover elementos en sustancias de fluidos (Novikova & Belchinskaya, 2016). Cabe considerar que el uso de materiales arcillosos presenta limitaciones. El proceso de adsorción de metales pesados se ve afectado por factores, la temperatura y el pH, las cuales pueden cambiar durante la obtención de los lodos dentro de la planta (Ismadj et al 2015), el pH de las soluciones a tratar, sería uno de los parámetros más importantes en la remoción de metales pesados dado que afecta la capacidad de carga superficial del adsorbato y adsorbente (Ismadj, 2015). Esto se debe a que la especiación de los metales es modificada por el pH del medio, formando complejos con compuestos inorgánicos (Bhattacharyya & Gupta, 2007). Se ha reportado que, en altos valores de pH se ve favorecida la capacidad de adsorción en las arcillas por la formación de cationes hidroxilados, aumentando la especificidad por metales alcalinos debido a la tendencia de los iones metálicos a hidrolizarse (Bergaya & Lagaly, 2013).

La rizofiltración se ha destacado como un proceso complementario altamente eficaz para la remoción de metales pesados, como el cobre (Cu) y el zinc (Zn), presentes en lodos

provenientes de Plantas de Tratamiento. Esta eficacia se atribuye a varias características fundamentales del proceso, como:

1. Capacidad de absorción selectiva: Las plantas utilizadas poseen la capacidad única de absorber selectivamente ciertos metales pesados a través de sus raíces.
2. Interacción raíces-microorganismos: Las raíces de las plantas forman simbiosis con microorganismos en el suelo, generando un entorno favorable para la descomposición y transformación de metales pesados. Esta interacción biológica no solo facilita la absorción inicial, sino que también contribuye a procesos de biodegradación que reducen la toxicidad de los contaminantes.
3. Efectividad en la reducción de cargas tóxicas: Al absorber y acumular metales pesados en sus tejidos, las plantas no solo eliminan estos contaminantes de los lodos, sino que también reducen significativamente la carga tóxica total, generando un residuo más seguro para su posterior disposición o reutilización (López et al, 2005).

La sugerencia de reducir la concentración de metales pesados mediante el uso de arcilla Bentonita respaldada por la fitorremediación para mejorar la eficacia parece una propuesta prometedora para la planta de tratamiento “Explotaciones Sanitarias S.A”. La implementación de estos métodos de bajo costo ofrece una solución viable para la gestión sostenible de lodos, con el beneficio adicional de la posibilidad de reutilizar los lodos en diversas aplicaciones, como suelos agrícolas.

Beneficios:

1. Eficiencia en la Eliminación: Los métodos propuestos han demostrado una alta efectividad en la eliminación de metales pesados, especialmente cobre y zinc, contribuyendo a la mejora de la calidad del efluente tratado.
2. Bajo Costo: La viabilidad económica de estos métodos los hace atractivos para la implementación, ofreciendo una solución rentable para la planta.
3. Reutilización de Lodos: La capacidad de reutilizar los lodos tratados en diversas aplicaciones, como en suelos agrícolas, contribuye a la reducción de costos asociados con su eliminación en vertederos.

Limitaciones:

1. Variabilidad Ambiental: Factores ambientales, como cambios en la temperatura y pH, pueden afectar la eficacia de los métodos propuestos, requiriendo una atención constante.
2. Requiere Infraestructura Adicional: La implementación de la fitorremediación podría requerir la creación de áreas específicas dentro de la planta, lo que implica inversiones adicionales.
3. Monitoreo Continuo: La efectividad de los métodos depende de un monitoreo continuo de las condiciones operativas y ambientales para asegurar resultados consistentes.
4. Posible Impacto en Agentes Biológicos: La fitorremediación implica la utilización de agentes biológicos, lo que podría verse afectado por cambios bruscos en las condiciones del entorno.

La propuesta de gestionar y comercializar el lodo fertilizante con el objetivo de reducir los costos operacionales en un 15% inicialmente, plantea varias observaciones y consideraciones importantes. En base a las observación vistas en la Tabla 13 y la ganancia proyectada de \$8.086.082 anualmente si se vendiera solo el 15% de los lodos de la planta:

1. Ventajas económicas y sostenibilidad: La gestión y comercialización del lodo fertilizante ofrece una oportunidad económica significativa al generar una ganancia proyectada de \$8.086.082. Este enfoque no solo contribuye a la reducción de costos operacionales de la planta, sino que también promueve la sostenibilidad al reutilizar un subproducto como fertilizante de alta calidad.
2. Calidad del producto y aceptación del mercado: La clave del éxito de esta propuesta radica en la calidad del lodo fertilizante. La comercialización exitosa dependerá de la pureza del producto y de cómo se posicione en el mercado agrícola. Es esencial realizar pruebas y certificaciones para garantizar que cumple con los estándares y regulaciones pertinentes.
3. Riesgos potenciales y gestión: Se deben considerar posibles riesgos, como la fluctuación en la demanda del mercado, cambios en las regulaciones o preocupaciones medioambientales. La implementación de estrategias de gestión de riesgos es esencial para mitigar posibles contratiempos.



## 6. Conclusiones

La eliminación de zinc y cobre en lodos provenientes de aguas residuales mediante el uso de arcilla bentonita sódica representaría una estrategia prometedora y efectiva para mitigar los impactos negativos de estos metales pesados en el medio ambiente y la salud humana. A través de este proceso, se lograría aprovechar las propiedades únicas de la arcilla bentonita sódica, como su alta capacidad de intercambio catiónico y su capacidad de adsorción, para remover selectivamente los iones de zinc y cobre de los lodos residuales.

Esta metodología ofrece numerosas ventajas, entre las que se incluyen la facilidad de implementación, la disponibilidad de la arcilla bentonita sódica en muchas regiones y su relativa asequibilidad. Además, la adsorción en arcilla bentonita sódica puede ser un método no invasivo y respetuoso con el medio ambiente, evitando la necesidad de utilizar productos químicos agresivos que podrían generar subproductos indeseables.

A medida que avanzamos hacia un enfoque más sostenible en la gestión del manejo de lodos y la protección del medio ambiente, la utilización de arcilla bentonita sódica para la eliminación de zinc y cobre en lodos se alinea con estos objetivos. Sin embargo, es esencial reconocer que la efectividad de este proceso puede depender de varios factores, como las condiciones de pH, la concentración inicial de metales y la calidad de la arcilla bentonita utilizada.

En última instancia, la investigación y la aplicación continua de esta técnica ofrecerían la posibilidad de reducir significativamente la carga de metales pesados sumado a la técnica de rizofiltración, la cual pretende mejorar la depuración de lodos residuales y, por ende, minimizar su impacto negativo en los ecosistemas acuáticos como también terrestres y la salud pública. Como conclusión, la eliminación de zinc y cobre en lodos mediante arcilla bentonita sódica y rizofiltración representa una solución valiosa y promisoriosa en la búsqueda de prácticas más responsables y sostenibles para el tratamiento de aguas contaminadas.

## 7. Referencias

Adriano, D. C, Page, A. L, Elseewi, A. A, Chang, A. C, Straughan, I. (1980). Utilización y eliminación de cenizas volantes y otros residuos de carbón en ecosistemas terrestres: una revisión. *Revista de Calidad Ambiental*, 9(3), 333-344.

Avedoy Gutiérrez, V. (2006). Diagnóstico básico para la gestión integral de residuos. Instituto Nacional de Ecología.

Baird, C. (2001). *Química Ambiental*. Editorial Reverté. University of Western Ontario.

Bergaya, G., Lagaly, G. (Eds.). (2013). *Handbook of Clay Science*, Volume 5.

Castells, X. E. (2012). Reciclaje de residuos industriales: residuos sólidos urbanos y fangos de depuradora.

Castro, J. D. (2019). Estudio de la remoción de cromo sobre una arcilla tipo bentonita.

Censo Entrega Final Chile. (2017). Instituto Nacional de Estadística. <http://www.censo2017.cl/>

Comonfort, I. (2006). Lodos Residuales. Estabilización y manejo. [http://dci.uqroo.mx/RevistaCaos/2006\\_Vol\\_1/Num\\_1/NO\\_Vol\\_I\\_21-30\\_2006.pdf](http://dci.uqroo.mx/RevistaCaos/2006_Vol_1/Num_1/NO_Vol_I_21-30_2006.pdf)

Chang, R. (2011). *Fundamentos de Química*. México-McGraw-Hill.

Decreto con Fuerza de Ley 382. Ley General de Servicios Sanitarios. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. (1989) <https://bcn.cl/3cgai>

Decreto 90. Establece Norma de Emisión para la Regulación de Contaminantes Asociados a las Descargas de Residuos Líquidos a Aguas Marinas y Continentales Superficiales. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. (2001)

Díaz, A., Veliz L., E., & Bataller M. (2015). Tratamiento de lodos, generalidades y aplicaciones. *Revista CENIC Ciencias Químicas*, 46, 1-10.

Durán, E. (1976). Antecedentes Geográficos e Históricos de Quilicura. En *Noticiario Mensual*, 234, 35. Museo Nacional de Historia Natural. Santiago. [https://publicaciones.mnhn.gob.cl/668/articles-66307\\_archivo\\_01.pdf](https://publicaciones.mnhn.gob.cl/668/articles-66307_archivo_01.pdf)

Explotaciones Sanitarias. (2000). S.A.: <https://esa.cl/quienes-somos/>

Ferrer Polo, J., Seco Torrecillas, A., & Robles Martínez, Á. (2018). Tratamientos biológicos de aguas residuales. Editorial Universitat Politècnica de València.

García, O. N. (2006). Lodos residuales: estabilización y manejo. *Caos Conciencia*, 1(1), 51-58.

Gautam, P. K., Gautam, R., Banerjee, S., Chattopadhyaya, M., & Pandey, J. (2016). Heavy metals in the environment: Fate, transport, toxicity, and remediation technologies.

Galvis Toro, J., & Rivera Guerrero, X. (2013). Caracterización fisicoquímica y microbiológica de los lodos presentes en la planta de tratamiento de aguas residuales industriales (ptari) de la empresa jugos hit de la ciudad de Pereira.

G. Zhao (2011). Sorción de iones de metales pesados de soluciones acuosas.

Guerra Cobián, V. H. (1996). Pretratamiento anaeróbico en sistemas de tratamiento biológico de aguas residuales (Tesis doctoral). Universidad Autónoma de Nuevo León.

Ghosh, M., & Singh, S. P. (2005). A Review on Phytoremediation of Heavy Metals and Utilization of Its Byproducts. *Applied Ecology and Environmental Research*, 3(1), 1-18.

Ibañez, C., Palomeque, S., & Fontúrbel, F. (2004). Elementos principales del suelo, geodinámica y dinámica de los principales componentes del suelo. En *El Recurso Suelo: Bases Edafolo Gas, Problemática, Administración y Contaminación*. Publicaciones Integrales, La Paz, 2-4.

I. Ismael, (2012). Remoción de plomo de soluciones acuosas mediante zeolitas naturales y pretratadas.

Informe del Estado del Medio Ambiente. (2018). Residuos en Chile. Eliminación/Valorización:

<https://sinia.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2021/04/10-residuos.pdf>

Journal of Multidisciplinary Engineering Science Studies (JMESS). (2015). Methods of Removing Heavy Metals from Industrial Wastewater.

Kobayashi, S., Imano, M., & Kimura, M. (1985). Inducción y degradación de Zn-, Cu- y Cd-tioneina en células hepáticas Chang. *Interacciones Químico-Biológicas*, 52(3), 319-334.

KG Bhattacharyya y SS Gupta, (2007). Adsorción de Co (II) de medio acuoso en caolinita y montmorillonita naturales y activadas con ácido.

Laws, J. E. A. (2003). Evaluación ambiental del sistema Tohá en la remoción de salmonela en aguas servidas domésticas. *Magister en Gestión y Planificación Ambiental*, Universidad de Chile, Santiago. 92 p.

Leyton Saldías, R. (2019). Hibridación programática industrial en contextos urbanos: Parque de Termovalorización Renca.

López, A., Barrera Fraire, J., Vallejo Rodríguez, R., & Barahona Argueta, C. (2008). Estudio comparativo entre un proceso fisicoquímico y uno biológico para tratar agua residual de rastro. *Interciencia*, 33(7), 490-496.

López, S., Melaj, M., Tomellini, G., & Martin, O. (2005). Rizofiltración en el tratamiento de aguas contaminadas con uranio. *Ing Sanit Amb*, 80, 78-81.

López, F. A. O., González, A. R., & Guzmán, J. M. G. (2017). Comparación de la reglamentación para el manejo de lodos provenientes de agua residual en Argentina, Chile y Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 8(1), 227-237.

Macías, J. G. L., & Guadalajara, J. (2013). Los lodos de las plantas de tratamiento de aguas residuales, ¿problema o recurso?

Méndez, J. P., Ramírez, C. A. G., Gutiérrez, A. D. R., & García, F. P. (2009). Contaminación y fitotoxicidad en plantas por metales pesados provenientes de suelos y agua. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 10(1), 29-44.

Naef A. A. Qasem, Ramy H. Mohammed, and Dahiru U. Lawal. (2021). Removal of heavy metal ions from wastewater: a comprehensive and critical review.

Normativas Chilenas (2009). Ley chilena: [https://www.bcn.cl/leychile/consulta/listado\\_n\\_sel?comp=&agr=1055&grupo\\_aporte=&sub=714](https://www.bcn.cl/leychile/consulta/listado_n_sel?comp=&agr=1055&grupo_aporte=&sub=714).

OCDE/CEPAL (2016). Evaluaciones del desempeño ambiental en Chile. Aspectos destacados:[https://www.oecd.org/environment/country-reviews/EPR\\_Chile\\_Aspectos\\_Destacados.pdf](https://www.oecd.org/environment/country-reviews/EPR_Chile_Aspectos_Destacados.pdf)

Prats, P. S. (2001). Efectos medioambientales de las prácticas agrícolas y su contabilización.

Posito, G., Lund, L. J., & Chang, A. C. (1982). Química de trazas de metales en suelos de campo de zonas áridas enmendados con lodos de depuradora: I. Fraccionamiento de Ni, Cu, Zn, Cd y Pb en fases sólidas. *Soil Science Society of America Journal*, 46(2), 260-264.

Pozo Odria, M. R. (2021). Remoción de sólidos suspendidos totales y aceites y grasas mediante el uso de sulfato de aluminio y arifloc C606 en el sistema de tratamiento de aguas residuales industriales. Corporación Miyasato SAC, Ate.

Ramón, V. L. (2010). Infraestructura sustentable: las plantas de tratamiento de aguas residuales. Quivera. *Revista de Estudios Territoriales*, 12(2), 58-69.

Reynolds, K. A. (2001). Tratamiento de aguas residuales en Latinoamérica. *Latinoamérica*, 48-49.

Rosas Peña, 2008. Fitoextracción de metales pesados presentes en sedimentos contaminados utilizando *Eucalyptus globulus*.

R. Zhu, Q. Chen (2016). Adsorbentes basados en montmorillonita para la eliminación de contaminantes del agua: una revisión.

Rojas, R. (2002). Sistemas de tratamiento de aguas residuales. *Gestión Integral de Tratamiento de Aguas Residuales*, 1(1), 8-15.

Romero Rojas, J. A. (2004). Tratamiento de aguas residuales, teoría y principios de diseño. Bogotá, CO, Escuela Colombiana de Ingenieros.

Rodríguez-González, M. R., Molina-Burgos, J., Jácome-Burgos, A., & Suárez-López, J. (2013). Humedal de flujo vertical para tratamiento terciario del efluente fisicoquímico de una estación depuradora de aguas residuales domésticas. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 14(2), 223-235.

Rubio, D. I. C., Calderón, R. A. M., Gualtero, A. P., Acosta, D. R., & Sandoval, J. (2015). Tratamientos para la remoción de metales pesados comúnmente presentes en aguas residuales industriales. Una revisión. *Ingeniería y Región*, (13), 73-90.

R.D.J.S.H.A.D.A.N.D.S.G. (2020). Saneamiento de América Latina y el Caribe. Del Banco Mundial:<https://openknowledge.worldbank.org/bitstream/handle/10986/33436/146823SP.pdf?sequence=6&isAllowed=y>

R. Pawar, Lalhmunsiana. (2016). Bentonita activada como adsorbente de bajo costo para la eliminación de Cu (II) y Pb (II) de soluciones acuosas.

Sacoto, A. (2011). Determinación de la efectividad del proceso de lombricultura como tratamiento para la estabilización de lodos en plantas de tratamiento de agua.

Sarricolea Espinoza, P., & Martín-Vide, J. (2014). El estudio de la isla de calor urbana de superficie del área metropolitana de Santiago de Chile con imágenes Terra-MODIS y análisis de componentes principales.

S. Pandey, (2017). Una revisión exhaustiva de los desarrollos recientes en materiales a base de bentonita utilizados como adsorbentes para el tratamiento de aguas residuales.

S. Ismadj (2015). *Clay Materials for Environmental Remediation*.

SGS. (2021a, julio). Informe de Análisis (N.o ES21-20564). SGS Chile Ltda.

SGS. (2021b, octubre). Informe de Análisis (N.o ES21-53822). SGS Chile Ltda.

Terreros-Mecalco, J., Olmos-Dichara, A., Noyola-Robles, A., Ramírez-Vives, F., & Monroy-Hermosillo, O. (2009). Digestión anaerobia de lodo primario y secundario en dos reactores UASB en serie. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 8(2), 153-161.

Uribe Moreno, T., Rojas Roa, N. Y., & Moreno Piraján, J. C. (s.f.). Lodos industriales-basura utilizable.

Usman, Kuzyakov, & Stahr (2005). Effect of Clay Minerals on Immobilization of Heavy Metals and Microbial

Vásquez, J., & Vargas, G. (2018). Aprovechamiento de lodos planta de tratamiento de aguas residuales municipio de Funza, como insumo de cultivo y mejoramiento del suelo.

Recuperado:<https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/16425/1/Trabajo%20de%20Grado%20-%20Lodos%20Funza.pdf>

Vullo, D. L. (2003). Microorganismos y metales pesados: una interacción en beneficio del medio ambiente. *Química viva*, 2(3), 93-104.

Zavaleta De la Cruz, L., Ñique Álvarez, M., & Lévano Crisóstomo, J. (2021). Caracterización fisicoquímica de los sedimentos del humedal la laguna bella en la selva de Huánuco, Perú. *Ecología Aplicada*, 20(2), 161-167.