

ALTERNATIVAS DE APROVECHAMIENTO DE LOS LODOS PROVENIENTES DE
PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE Y RESIDUAL INDUSTRIAL 1

Alternativas de aprovechamiento de los lodos provenientes de plantas de tratamiento de
agua potable y residual industrial

Diana Lineth Mendoza Cañas y Amanda Johana Fajardo Mendieta

Trabajo de Grado para Optar el título de Especialista en Química Ambiental

Director
Luz Yolanda Vargas Fiallo
Magister en Química

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ciencias
Escuela de Química
Especialización en Química Ambiental
Bucaramanga
2020

Agradecimientos

A nuestros familiares y amigos por su constante apoyo, compañía y motivación.

A los profesores de la Especialización en Química Ambiental por aportar sus experiencia, dedicación y valiosas enseñanzas en el transcurso de la especialización.

A Yolanda Vargas por brindarnos la oportunidad de realizar este trabajo de grado, al igual que su colaboración y paciencia para la finalización de este.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	16
1. Objetivos.....	19
1.1 Objetivo General.....	19
1.2 Objetivos Específicos.....	19
2. Aspectos Generales.....	20
2.1 Metodología	21
3. Formación de los lodos en una planta de tratamiento de agua potable.....	23
3.1 Etapas de tratamiento del agua potable.....	24
3.1.1 Pretratamiento	25
3.1.2 Coagulación	25
3.1.3 Floculación.....	26
3.1.4 Sedimentación.....	26
3.1.5 Filtración	26
3.1.6 Desinfección	27
3.2 Tratamiento de los lodos en una planta de tratamiento de agua potable	28
3.2.1 Homogenización y acondicionamiento químico.....	29
3.2.2 Espesamiento	29
3.2.2.1 Espesamiento por gravedad.	30
3.2.2.2 Espesamiento por flotación.....	30

ALTERNATIVAS DE APROVECHAMIENTO DE LOS LODOS PROVENIENTES DE
PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE Y RESIDUAL INDUSTRIAL 4

3.2.3 Deshidratación	31
3.2.3.1 Sistemas de secado natural.....	32
3.2.3.2 Lechos de secado	32
3.2.3.3 Centrifugación.....	33
3.2.3.4 Filtros al vacío.....	33
3.2.3.5 Filtro banda.	33
3.2.3.6 Filtro prensa.	34
3.2.4 Secado	34
3.2.4.1 Secado por convección.	35
3.2.4.2 Secado por radiación.....	35
3.2.5 Disposición final	35
4. Formación de los lodos en una planta de tratamiento de agua residual.....	35
4.1 Etapas del tratamiento de las aguas residuales	37
4.1.1 Pretratamiento	39
4.1.2 Tratamiento primario	40
4.1.3 Tratamiento secundario.....	40
4.1.4 Tratamiento terciario.....	40
4.2 Tipos de lodos en el tratamiento de agua residual	41
4.2.1 Lodo primario	42
4.2.2 Lodo activado.....	42
4.2.3 Lodo activado de retorno	42
4.2.4 Lodo secundario.....	42

ALTERNATIVAS DE APROVECHAMIENTO DE LOS LODOS PROVENIENTES DE
PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE Y RESIDUAL INDUSTRIAL 5

4.2.5 Lodo terciario.....	43
4.3 Tratamiento de los lodos en una planta de tratamiento de agua residual.....	43
4.3.1 Espesamiento	43
4.3.1.1 Espesamiento por gravedad.	44
4.3.1.2 Espesamiento por centrifugación.....	44
4.3.1.3 Espesamiento por flotación.....	44
4.3.2 Estabilización.....	45
4.3.2.1 Estabilización con cal.	45
4.3.2.2 Tratamiento térmico.....	45
4.3.2.3 Digestión anaeróbica.....	46
4.3.2.4 Digestión aeróbica.	47
4.3.2.5 Compostaje.	47
4.3.3 Acondicionamiento.....	48
4.3.3.1 Acondicionamiento químico.....	48
4.3.3.2 Acondicionamiento térmico.....	49
4.3.4 Deshidratación	49
4.3.5 Incineración.....	50
4.3.6 Disposición final.....	50
5. Características fisicoquímicas y microbiológicas de los lodos provenientes del tratamiento de agua potable y residual industrial	53
5.1 Características fisicoquímicas y microbiológicas de los lodos provenientes del tratamiento de agua potable	53

ALTERNATIVAS DE APROVECHAMIENTO DE LOS LODOS PROVENIENTES DE
PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE Y RESIDUAL INDUSTRIAL 6

5.2 Características fisicoquímicas y microbiológicas de los lodos provenientes del tratamiento de agua residual industrial	57
6. Marco Normativo.....	61
6.1 Normatividad para lodos provenientes de plantas del tratamiento de agua potable	61
6.2 Normatividad para lodos provenientes de plantas de tratamiento de agua residual	62
6.2.1 Clasificación de los biosólidos según la normatividad colombiana	66
7. Alternativas de aprovechamiento para los lodos generados en las plantas de tratamiento de agua potable y residual en la industria.....	71
7.1 Alternativas de aprovechamiento de lodos generados en las plantas de tratamiento de agua potable.....	71
7.1.1 Uso en los procesos de tratamiento de aguas residuales.....	71
7.1.1.1 Adsorbente de contaminantes y metales	72
7.1.1.2 Acondicionador y deshidratador	75
7.1.1.3 Recuperación y reutilización del coagulante	76
7.1.1.4 Uso como coagulante.....	79
7.1.1.5 Como sustrato en humedales artificiales.....	81
7.1.2 Fabricación de ladrillos, productos cerámicos y materiales de construcción	84
7.1.2.1 Fabricación de ladrillos y cerámicas.....	84
7.1.2.2 Fabricación de cemento y materiales de cemento.....	87
7.1.3 Como aditivo para la producción de biogás.....	88
7.1.4 Aplicación en el suelo.....	89

ALTERNATIVAS DE APROVECHAMIENTO DE LOS LODOS PROVENIENTES DE
PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE Y RESIDUAL INDUSTRIAL 7

7.2 Alternativas de aprovechamiento de lodos generados en las plantas de tratamiento de agua residual.....	93
7.2.1 Preparación de adsorbentes carbonáceos	95
7.2.2 Aprovechamiento energético	98
7.2.3 Fabricación de cerámicas.....	101
7.2.4 Fabricación de materiales de construcción	102
7.2.5 Aplicación en el suelo.....	105
7.2.6 Material de cobertura en vertederos.....	107
8. Conclusiones	108
Referencias Bibliográficas	114

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Valores característicos de los parámetros más frecuentemente estudiados en los lodos	36
Tabla 2. Método de tratamiento de las aguas residuales	37
Tabla 3. Valores promedio de los lodos provenientes de PTAP	54
Tabla 4. Composición química de los lodos de alumbre y lodos férricos	55
Tabla 5. Contaminantes presentes en el agua residual y sus efectos	57
Tabla 6. Parámetros fisicoquímicos de los lodos reportados en diferentes industrias	60
Tabla 7. Normatividad colombiana para el manejo de lodos generados en el tratamiento de agua residual	63
Tabla 8. Características de peligrosidad de los residuos o desechos peligrosos	65
Tabla 9. Valores máximos permisibles para la categorización del biosólido	66
Tabla 10. Categoría, clasificación y uso de los biosólidos	68

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Pasos utilizados para el desarrollo de los objetivos propuestos	23
Figura 2. Sistema convencional de tratamiento de agua potable	27
Figura 3. Línea de tratamiento de lodos en un PTAP	28
Figura 4. Espesamiento por gravedad	30
Figura 5. Espesamiento por flotación	31
Figura 6. Sistema de secado natural	32
Figura 7. Esquema del tratamiento de aguas residuales y la clasificación de los lodos	41
Figura 8. Etapas de tratamiento de los lodos residuales para su disposición final	52
Figura 9. Diagrama de flujo de generación y reutilización de lodo para la recuperación y reutilización del coagulante	77
Figura 10. Ilustración de la integración beneficiosa de los lodos de alumbre en el tratamiento de aguas residuales	83
Figura 11. Ventajas y desventajas de algunos usos de los lodos de PTAP	92
Figura 12. Usos de lodos residuales con base en su origen y los productos obtenidos de diversos procesos	94
Figura 13. Rutas potenciales de conversión de lodos a biocombustible	98

Glosario

Acueducto: es un sistema o conjunto de sistemas de irrigación, que permite transportar agua en forma de flujo continuo desde un lugar en el que esta accesible en la naturaleza, hasta un punto de consumo distante.

Agua cruda: es el agua que no ha tenido ningún tratamiento, que se encuentra pura en la naturaleza.

Agua potable: se denomina al agua apta para el consumo de humanos o que puede ser consumida sin restricción para beber o preparar alimentos.

Agua residual: cualquier tipo de agua cuya calidad se vio afectada negativamente por influencia antropogénica. Incluye las aguas usadas, domesticas, urbanas y los residuos líquidos industriales o mineros eliminados, o aguas que se mezclaron con las anteriores.

Alcantarillado: se denomina al sistema de estructuras y tuberías usados para el transporte de aguas residuales o servidas (alcantarillado sanitario), o aguas de lluvias (alcantarillado pluvial) desde un lugar en que se generan hasta el sitio en que se vierten a cause o se tratan.

Biomasa: cantidad de materia acumulada en un individuo, un nivel trófico, una población o un ecosistema; originada en un proceso biológico, espontáneo o provocado como fuente de energía.

Biosólidos: lodos que han sido sometidos a procesos de estabilización y que, por su contenido de materia orgánica, nutrientes y características adquiridas después de su estabilización, pueden ser susceptibles de aprovechamiento.

Clinker: Es la principal materia prima de la que se obtiene el cemento.

Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO): parámetro indicador de contaminación del agua, que mide el contenido en el agua de sustancias bioquímicamente desagradables.

Demanda Química de Oxígeno (DQO): concentración en mg/L de oxígeno, que es equivalente a la cantidad de un oxidante específico gastado en la digestión de un agua bajo condiciones definidas.

Flóculos: conjunto de materia orgánica o inorgánica formado por agregación de sólidos en suspensión, que se obtiene mediante tratamiento químico, físico o biológico. Puede ocurrir de forma natural, pero es usualmente inducido con el fin de eliminar ciertas partículas del agua residual.

Gasificación: proceso térmico mediante el cual el contenido carbonoso de los lodos de PTAR se transforma en gas combustible y cenizas bajo una atmósfera reducida neta.

Hormigón: también conocido como concreto, es un material compuesto empleado en construcción, formado esencialmente por un aglomerante al que se añade áridos, agua y aditivos específicos.

Incineración: es la combustión completa de la materia orgánica hasta su conversión en cenizas, usada en el tratamiento de basuras. Se lleva a cabo en hornos, mediante oxidación química en exceso de oxígeno.

Lixiviado: líquido proveniente de los lodos y biosólidos, el cual se forma por reacción o percolación y que contiene contaminantes disueltos o en suspensión.

Lodos: son sólidos con un contenido variable de humedad, provenientes del desazolve de los sistemas de alcantarillado urbano o municipal, de las plantas potabilizadoras y de las plantas de tratamiento de aguas residuales, que no han sido sometidos a procesos de estabilización.

Materia orgánica: es materia elaborada de compuestos orgánicos que provienen de los restos de organismos que alguna vez estuvieron vivos, tales como plantas, animales y sus productos de residuo en el ambiente natural.

Metal pesado: es un miembro de un grupo de elementos químicos no muy bien definido que exhibe propiedades metálicas.

Pirólisis: es el proceso a través del cual las sustancias orgánicas se descomponen térmicamente en una atmosfera libre de oxígeno, a temperaturas que varían en el rango de los 300 a 900°C.

Sólidos Totales (ST): son los materiales residuales que permanecen en los lodos y biosólidos, que han sido deshidratados 103°C a 105°C, hasta alcanzar un peso constante y son equivalentes en base a peso seco.

Sólidos Volátiles (SV): son sólidos orgánicos totales presentes en los lodos y biosólidos que se volatilizan cuando estos se queman a 550°C en presencia de aire por un tiempo determinado.

Resumen

Título: Alternativas de aprovechamiento de los lodos provenientes de plantas de tratamiento de agua potable y residual industrial*

Autoras: Diana Lineth Mendoza Cañas, Amanda Johana Fajardo Mendieta**

Palabras Clave: Lodos, agua natural, agua residual, valorización, aprovechamiento.

Descripción: En el tratamiento del agua natural y residual se producen desechos o subproductos conocidos como lodos; se producen en grandes cantidades y contienen sustancias y/o elementos que generan contaminación en los cuerpos de agua y suelo, especialmente aquellos provenientes del agua residual industrial. Es por esta razón, que los lodos deben ser tratados o transformados con el fin de reducir el impacto que sus elementos contaminantes pueden causar en el medio ambiente y la salud humana.

Con el incremento poblacional y el aumento de la cantidad de agua potable requerida y aguas residuales generadas (industrial y doméstica), existe una mayor producción de estos residuos. A esto se le suma que muchos de estos lodos son dispuestos de manera inadecuada, lo que causa impactos ambientales negativos. Por esta razón, es muy importante y necesario implementar tecnologías que promuevan la valorización y el aprovechamiento sostenible de estos residuos y de esta manera, encontrar un destino final que contribuya de manera positiva a la preservación y/o recuperación del medio ambiente. Debido a lo anterior, el objetivo de esta monografía es realizar una búsqueda bibliográfica de los últimos 10 años sobre el tratamiento y las alternativas de aprovechamiento actuales de los lodos generados en plantas de tratamiento de agua potable y residual industrial.

* Trabajo de Grado para optar al título de Especialista en Química Ambiental. Modalidad monografía

** Facultad de Ciencias. Escuela de Química. Especialización en Química Ambiental. Directora: Luz Yolanda Vargas Fiallo. Magister en Química.

Abstract

Title: Alternatives for the use of sludge from drinking water and industrial wastewater treatment plants *

Authors: Diana Lineth Mendoza Cañas, Amanda Johana Fajardo Mendieta **

Key Words: Sludge, natural water, wastewater, recovery, use.

Description: In the treatment of natural water and wastewater, waste or by-products known as sludge are produced; they are produced in large quantities and contain substances and/or elements that generate pollution in water and soil, especially those coming from industrial wastewater. It is for this reason that sludge must be treated or transformed in order to reduce the impact that its pollutants can cause on the environment and human health.

With the population increase and the increase in the amount of drinking water required and wastewater generated (industrial and domestic), there is a greater production of these wastes. In addition to this, a large part of the sludge is disposed of in an inappropriate way, which causes negative environmental impacts. For this reason, it is very important and necessary to implement technologies that promote the recovery and sustainable use of these wastes and in this way, find a final destination that contributes positively to the preservation and/or recovery of the environment. Due to the above, the objective of this monograph is to carry out a bibliographic search of the last 10 years on the treatment and current alternatives for the use of sludge generated in drinking water and industrial wastewater treatment plants.

* Degree Work to qualify for the title of Specialist in Environmental Chemistry. Monograph modality

** Science Faculty. School of Chemistry. Specialization in Environmental Chemistry. Director: Luz Yolanda Vargas Fiallo. Magister in Chemistry.

Introducción

La población colombiana crece a un ritmo vertiginoso, según la información publicada en el Departamento Administrativo Nacional de Estadística – DANE, en los últimos 35 años la población del país ha aumentado en un 65%, y adicionalmente se proyecta que a futuro ese crecimiento va a estar acompañado de un importante proceso de urbanización. En consecuencia, se genera un aumento en la demanda de agua para consumo humano, agricultura y energía, entre otras actividades. Al igual que se generan una gran cantidad de aguas residuales domésticas e industriales.

Para el tratamiento del agua potable y el agua residual es preciso contar con plantas de tratamiento de agua. En Colombia, la zona urbana cuenta con agua potable para 28,1 millones de personas (solo 86,11% de la población total cuenta con este servicio), por lo cual es necesario la implementación de un mayor número de PTAPs para cubrir esta demanda. En cuanto a las plantas de tratamiento de agua residual doméstica (PTARD), según la información sectorial de servicios públicos domiciliarios de acueducto y alcantarillado en 2016, se identificaron 696 plantas, en 541 municipios de los 1.122 registrados por el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). Esto indica un avance en cuanto a la construcción de PTARD, ya que del 28% en el año 2010 se pasó a un 42% para el año 2017. Sin embargo, aunque la construcción de plantas de tratamiento de agua residual ha ido en incremento, aun se puede observar una falta de sistemas de alcantarillado en gran parte de los municipios.

Por otra parte, en los procesos de tratamiento de agua, tanto de agua potable como residual, se generan subproductos o desechos conocidos como lodos. La potabilización por medio de tratamientos fisicoquímicos genera un volumen de lodos de aproximadamente 15 % del volumen de agua tratada, es decir, que por 1.35×10^9 m³/año de agua potable, se producen aproximadamente 120.000 toneladas de lodo por año. Asimismo, en las PTAR la densidad de casi todos los lodos generados en un sistema de tratamiento de agua residual, se encuentra entre 1.03 kg/m³ y 1.06 kg/m³ diarios (T. Ahmad et al., 2016a).

El asentamiento urbano, el crecimiento poblacional y el aumento desmedido en la demanda de productos, han elevado la cantidad de consumo de agua en sus diferentes actividades productivas, y a su vez han generado mayor cantidad de agua residual, esto implica un aumento en la generación de lodos producto del tratamiento de las aguas.

El volumen de los lodos que se producen depende principalmente de las características del agua potable y residual, del grado de tratamiento previo, del tiempo de sedimentación o retención de los lodos, de la densidad de sólidos, del contenido de humedad, del tipo de características fisicoquímicas y microbiológicas de este, del método de estabilización o acondicionamiento y de la frecuencia de remoción de estos, estas características determinaran el uso de los lodos o su disposición final en caso que no se les pueda dar un uso (Toro & Guerrero, 2013).

Este subproducto generado en las PTAP y PTAR debe disponerse de manera adecuada y segura, debido a que, si son vertidos directamente sin ningún tratamiento en el suelo o en las cuencas hidrográficas pueden generar contaminación, deterioro en la biodiversidad y afectaciones a la salud y al ambiente. Sin embargo, gran parte de ellos termina como residuo

sólido en rellenos sanitarios o en botaderos a cielo abierto generando impactos ambientales negativos.

Estudios han mostrado que los lodos poseen características físicas, químicas y microbiológicas que les permiten convertirse en un producto al que se le puede dar un uso y mayor aprovechamiento en diferentes áreas, como la construcción, producción de biocombustible, fabricación de cerámicas y ladrillos, uso agrícola como fertilizante y restaurador de suelo, acondicionador de suelo, como material de cobertura, entre otros. De esta manera, se evita su disposición en rellenos sanitario, postergando su vida útil, y evitando la producción de gases y contaminantes atmosféricos.

En la actualidad se incorpora el concepto de economía circular, es decir dar un uso a los residuos generados en las diferentes actividades. El manejo y disposición final de los lodos procedentes de PTAP y PTAR representa un gran parte de los costos operativos de las plantas de tratamiento de aguas. Por esta razón, en la actualidad se pretende incorporar el concepto de economía circular en la valorización de los lodos incorporándolos en los diferentes procesos productivos del país, ya sea como nutriente o como aditivo tecnológico. De acuerdo con lo anterior, esta monografía tiene como objetivo hacer una revisión bibliográfica sobre el tratamiento y los diferentes usos de estos lodos que han sido investigados en los últimos 10 años que permitan darles una disposición diferente a estos subproductos.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Hacer una revisión bibliográfica sobre el tratamiento y aprovechamiento de los lodos provenientes de las plantas de tratamiento de agua potable y residual en la industria.

1.2 Objetivos Específicos

Explicar el proceso de tratamiento de los lodos generados en las plantas de tratamiento de agua potable y residual en la industria.

Describir las características de los lodos provenientes del tratamiento de agua potable y residual en la industria.

Revisar la normatividad nacional para el manejo y disposición final de los lodos provenientes del tratamiento de agua potable y residual.

Revisar las alternativas de aprovechamiento para los lodos generados en las plantas de tratamiento de agua potable y residual en la industria.

2. Aspectos generales

Todo tratamiento de agua produce un desecho o residuo conocido como lodo. Estos residuos son generados en grandes cantidades durante el tratamiento del agua potable y el tratamiento del agua residual, siendo el producto de la acumulación de sólidos u otras sustancias. Su composición depende en gran medida del tipo de agua a tratar y los procesos empleados durante el tratamiento del agua. Su manejo y disposición representan un gran problema debido a su alto potencial contaminante.

Hace algunos años no se prestaba mucha atención a los lodos que se producían durante el tratamiento del agua potable, considerando que estos lodos estaban formados por sustancias que ya llevaban las aguas naturales. Sin embargo, hoy en día sabemos que las aguas naturales se han ido degradando y existe una mayor concientización y presión medioambiental provocando que haya una mayor preocupación por la gestión de estos residuos (Ramírez, 2008).

La descarga de estos residuos a corrientes naturales llega a plantear problemas importantes, ya que, si bien son residuos mayormente inorgánicos, van formando depósitos en los tramos lentos del cauce lo que aumenta la turbiedad y el color de las aguas receptoras y disminuyen la actividad fotosintética de las plantas acuáticas (Ramírez, 2008).

En cuanto a los lodos provenientes del tratamiento de las aguas residuales existe una mayor preocupación debido que estos contienen concentraciones de metales pesados, contaminantes tóxicos y organismos patógenos los cuales representan un riesgo tanto para la salud humana como para el medio ambiente. Por ello es preciso buscar tratamientos adecuados

que permitan, preferiblemente, una utilización racional de estos residuos y en caso de ser inevitable esta alternativa, proceder a la disposición de estos residuos de la forma más conveniente, desde el punto de vista económico y ambiental (Mahamud López et al., 1996).

En la actualidad existen numerosos grupos de investigación, concentrados especialmente en la Comunidad Económica Europea y en Estados Unidos, que estudian y formulan alternativas para el manejo de los lodos con especial énfasis en sus características fisicoquímicas y microbiológicas. Algunos países utilizan estos lodos como mejoradores de suelos o como materia prima para compostaje. Sin embargo, la mayoría de estos son dispuestos en rellenos sanitario o se incineran en plantas de combustión (Joya Prada, 2014).

El tratamiento de aguas y la gestión de los residuos que produce son temas globales, con desafíos crecientes, que deben abordar las preocupaciones de todos los interesados, incluidos los administradores y operadores de las instalaciones, los reguladores, los políticos, la comunidad científica, los generadores de aguas residuales, los contribuyentes y el público en general. Es un campo que requiere una activa investigación debido a la necesidad de formular alternativas para estos residuos que no generen un impacto en el ambiente y en la salud humana.

2.1 Metodología

La presente monografía se basó en el análisis de la información relacionada con el uso de los lodos generados en las plantas de tratamiento de agua potable y de agua residual industrial existentes en las bases de datos de la biblioteca de la Universidad Industrial de Santander como Science Direct del grupo Elsevier. Además de información recopilada en libros, normatividad

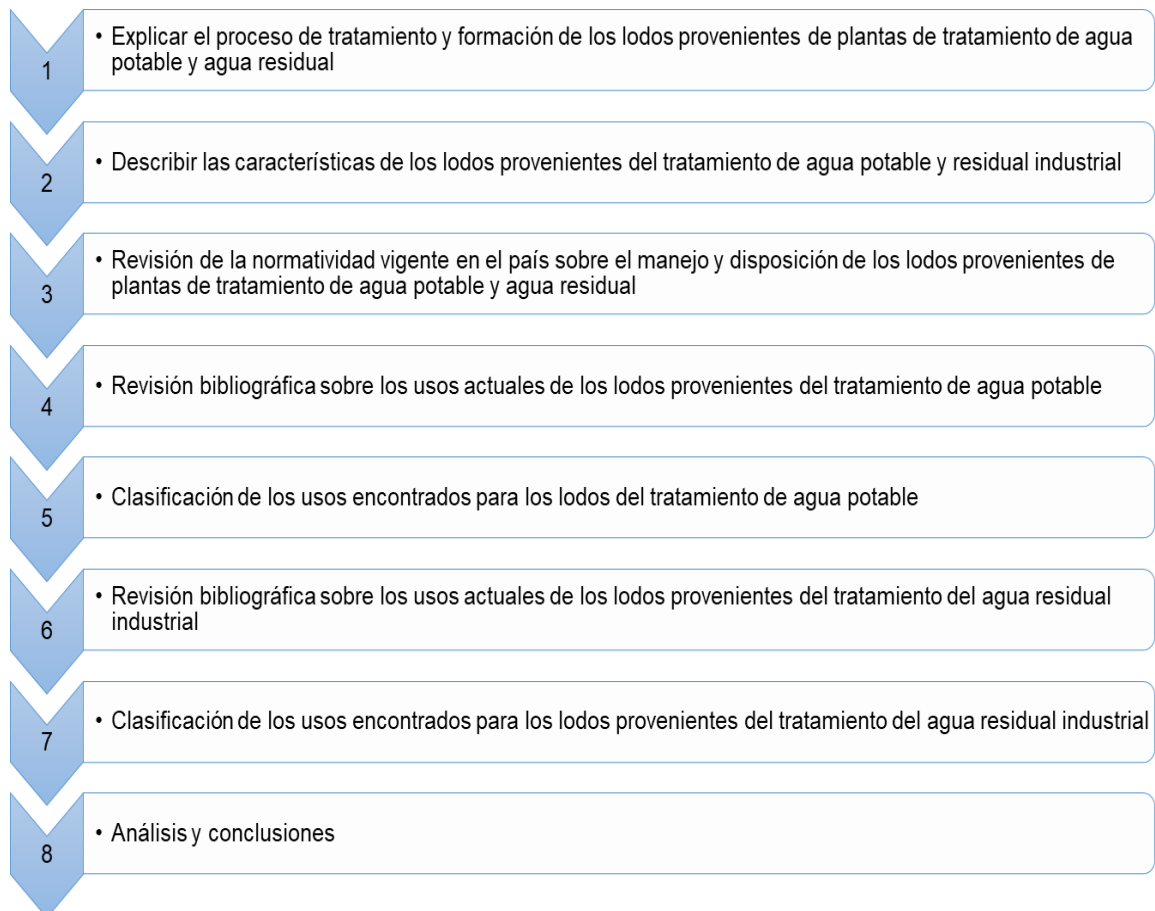
actual vigente en el país y diferentes trabajos de grado relacionados con el tema alrededor de país y en otros países.

La búsqueda bibliográfica se centró en publicaciones de la literatura científica de los últimos diez (10) años relacionadas con el uso de los lodos generados en las plantas de tratamiento de agua potable y residual industrial. Las palabras clave utilizadas durante la búsqueda de información relacionada con lodos provenientes del tratamiento de agua potable fueron “sludge” “drinking water” “utilization” “use” y “water”. Y para la búsqueda de información sobre lodos provenientes del tratamiento de agua residual se utilizaron palabras clave como “sludge” “sewage sludge” “utilization” y “wastewater”

A continuación, se describen los pasos utilizados para el desarrollo de los objetivos propuestos para esta monografía:

Figura 1.

Pasos utilizados para el desarrollo de los objetivos propuestos



3. Formación de los lodos en una planta de tratamiento de agua potable

El tratamiento del agua para consumo humano implica la producción de lodos como subproductos. Grandes volúmenes de lodo o residuos son generados durante el tratamiento del agua cruda para hacerla potable. Se aproxima que una típica planta de tratamiento de agua

produce alrededor de 100,000 toneladas de lodo por año (T. Ahmad et al., 2016a). Los lodos producidos dentro del proceso de potabilización de las aguas crudas están conformados por sustancias frecuentes en ellas, tales como, arcillas, arenas finas o limos. Además de esto, incluyen aquellos residuos que se generan durante el tratamiento del agua como óxidos hidratados de aluminio, junto con materia de naturaleza orgánica e inorgánica. En la mayoría de los casos son estables y no putrescibles (Córdova, 2012).

Las características del lodo dependen del origen del agua cruda y de los sistemas usados durante el tratamiento del agua y del lodo. Diferentes procesos de tratamiento generan diferentes tipos y volúmenes de lodo. En una planta en particular, las características del lodo pueden cambiar anual, estacional o diariamente (Luciano et al., s. f.).

Las plantas convencionales de potabilización de agua incluyen etapas de coagulación, floculación, sedimentación y filtración, se producen lodos en todos los procesos, excepto en la coagulación (Gutiérrez-Rosero et al., 2014).

3.1 Etapas de tratamiento del agua potable

Las plantas de tratamiento de agua potable (PTAP), por lo general llevan un lineamiento en común, los cuales varían de acuerdo a la procedencia del agua cruda. Dentro de los principales procesos de tratamiento de una planta de tratamiento de agua potable se encuentran: el pretratamiento, coagulación-floculación, sedimentación, filtración y desinfección (Figura 1) (Córdova, 2012).

3.1.1 Pretratamiento

En este proceso se eliminan los sólidos de mayor tamaño que se encuentran en el agua (ramas, madera, piedras, plásticos, etc.) por medio del uso de rejillas o tamices donde quedan atrapados los sólidos (Chulluncuy-Camacho, 2011). Cuando el contenido de arenas y sólidos similares en suspensión es elevado, se emplean desarenadores donde los sólidos sedimentan por gravedad (Córdova, 2012).

Posteriormente, suele incluirse un proceso de aireación, dejando caer el agua en una cascada para incrementar la proporción de oxígeno disuelto, facilitando la depuración por medio de bacterias aerobias. El pretratamiento también suele incluir una oxidación primaria, con dióxido de cloro (ClO_2) que actúa como una etapa de pre desinfección, eliminando las sustancias orgánicas (Córdova, 2012).

3.1.2 Coagulación

Antes de la sedimentación, se ajusta el pH mediante la adición de ácidos (clorhídrico, sulfúrico) o de álcalis (hidróxido sódico, hidróxido cálcico) (Córdova, 2012). La coagulación consiste en la adición de coagulantes (sales de hierro o aluminio) con el fin de desestabilizar las partículas coloidales, eliminando las fuerzas de repulsión entre ellas, dando lugar a partículas de mayor tamaño (floculación) (Chulluncuy-Camacho, 2011).

3.1.3 Floculación

La floculación es el proceso por el cual las partículas desestabilizadas chocan entre si y se aglomeran formando los flóculos. Consiste en una agitación suave y lenta, se añaden agentes floculantes que ayudan a la formación de flóculos de mayor tamaño (Córdova, 2012).

Durante los procesos de coagulación y floculación, aparte de la remoción de turbiedad y color también se eliminan bacterias, virus y organismos patógenos, así como sustancias que generan mal sabor y olor (Chulluncuy-Camacho, 2011).

3.1.4 Sedimentación

En este proceso los flóculos formados en la etapa anterior por la acción de los agentes coagulantes y floculantes sedimentan y son removidas o separadas de la parte líquida. Se realiza en tanques de forma circular o rectangular, obteniéndose en la parte superior el agua clarificada y por el fondo una corriente de lodos que contienen los flóculos son separados (Córdova, 2012).

3.1.5 Filtración

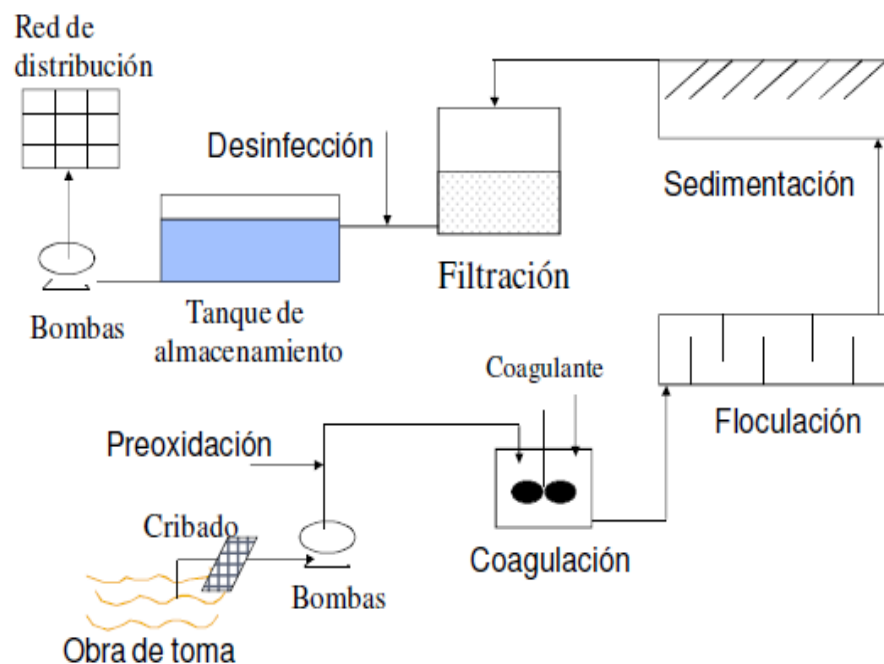
Esta fase es la responsable de que se cumplan los estándares de calidad del agua potable ya que los filtros tienen una eficiencia de remoción superior al 99% (Chulluncuy-Camacho, 2011). En esta etapa el agua clarificada proveniente del proceso de sedimentación, que todavía contiene material en suspensión, es filtrada a través de un medio poroso que permite el paso del líquido, pero no de las partículas sólidas. Los medios filtrantes más utilizados son la arena y el carbón activo granular (Córdova, 2012).

3.1.6 Desinfección

Este es el último proceso de tratamiento del agua. Consiste en la destrucción selectiva de los organismos potencialmente infecciosos. No todos los organismos son eliminados en este proceso, por lo que requieren procesos previos como la coagulación, floculación y sedimentación para su eliminación (Chulluncuy-Camacho, 2011).

Figura 2.

Sistema convencional de tratamiento de agua potable



Nota. Estudio para el tratamiento, manejo y disposición final de lodos generados en plantas de tratamiento de agua potable (Córdova, 2012)

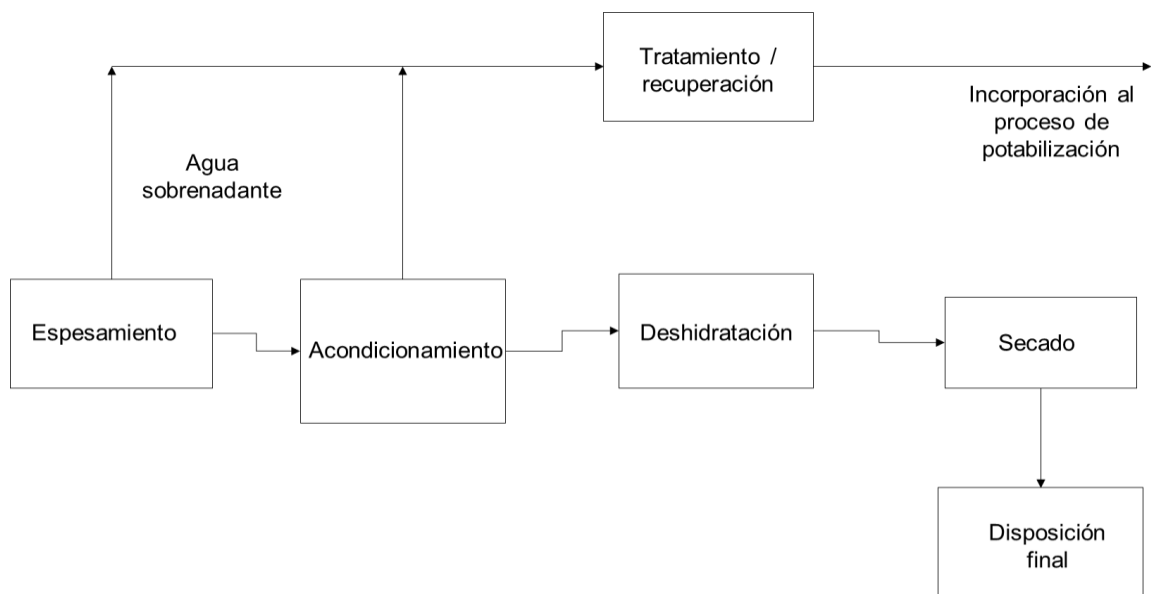
3.2 Tratamiento de los lodos en una planta de tratamiento de agua potable

El tratamiento de lodos generados en el proceso de tratamiento del agua potable es más simple que aquel necesario en los lodos provenientes de las aguas residuales debido al menor contenido de materia orgánica degradable, por lo cual, se elimina la etapa de la estabilización biológica. Su objetivo principal es la concentración de sólidos para la reducción de su volumen y así facilitar su manejo y disposición final (Córdova, 2012).

Los lodos son originados en el tratamiento del agua potable en las etapas de sedimentación, donde generalmente precipitan por gravedad y en el lavado de los filtros. Dado que se extraen de forma intermitente y las concentraciones son bastantes diferentes, es aconsejable enviarlos a un tanque de mezcla y almacenamiento, donde puedan ser homogenizados para ser enviados a las posteriores etapas de tratamiento (Ramírez, 2008).

Figura 3.

Línea de tratamiento de lodos en un PTAP



Nota. Estudio para el tratamiento, manejo y disposición final de lodos generados en plantas de tratamiento de agua potable (Córdova, 2012)

De acuerdo con lo anterior, el tratamiento de los lodos consiste principalmente en cinco etapas: homogenización y acondicionamiento químico, espesamiento, deshidratación, secado y finalmente su disposición final.

3.2.1 Homogenización y acondicionamiento químico

La homogenización es un proceso en el que se realiza una mezcla de las sustancias presentes en el lodo para unificar la consistencia y concentración de este (Córdova, 2012). Es muy importante tener en cuenta este paso, ya que, si las concentraciones que llegan a la fase de espesamiento son muy variables, el rendimiento se verá afectado (Ramírez, 2008).

El acondicionamiento químico consiste en utilizar agregados que reaccionan con el lodo producido para facilitar la separación del líquido y sólido. Uno de los más usados es la adición de coagulantes, como el cloruro férrico, cal o polímeros orgánicos. También es utilizada la ceniza producida en la incineración de los lodos como agente acondicionador (Córdova, 2012).

3.2.2 Espesamiento

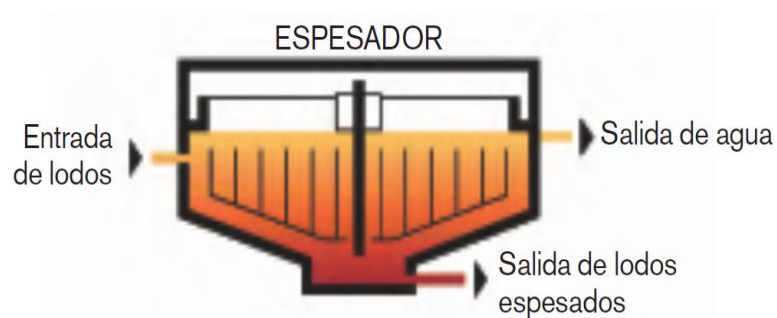
El espesamiento consiste en utilizar técnicas que ayuden a eliminar un porcentaje de agua en primer plano (Córdova, 2012). Generalmente tiene lugar en decantadores, ya sea por gravedad o por flotación. En muchas instalaciones se emplean ambos sistemas de decantadores:

comenzando por un decantador por gravedad y de ahí el lodo extraído es llevado a los decantadores por flotación (Ramírez, 2008).

3.2.2.1 Espesamiento por gravedad. El espesamiento por gravedad suele llevarse a cabo en decantadores estáticos circulares o rectangulares provistos de rasquetas que arrastran el lodo precipitado hacia las arquetas de recogida. El agua clarificada se extrae en la parte superior por vertederos situados allí (Ramírez, 2008).

Figura 4.

Espesamiento por gravedad



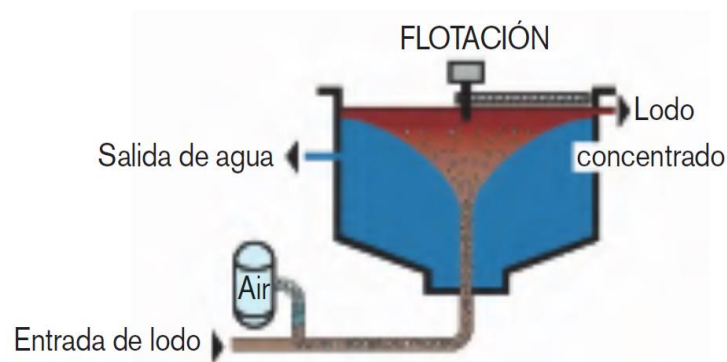
Nota. Lodos producidos en el tratamiento del agua potable (Ramírez, 2008)

3.2.2.2 Espesamiento por flotación. En este proceso se aprovecha la flotabilidad de las partículas (flóculos) cuando se les adhieren pequeñas burbujas de aire. Se puede presurizar directamente la mezcla de lodos con aire, a una presión de 6 bares y se descomprime después a la entrada del flotador o también se puede presurizar directamente agua clarificada que se inyecta

en el lodo. El lodo espesado es retirado de la superficie por medio de frasetas superficiales (Ramírez, 2008).

Figura 5.

Espesamiento por flotación



Nota. Lodos producidos en el tratamiento del agua potable (Ramírez, 2008)

3.2.3 Deshidratación

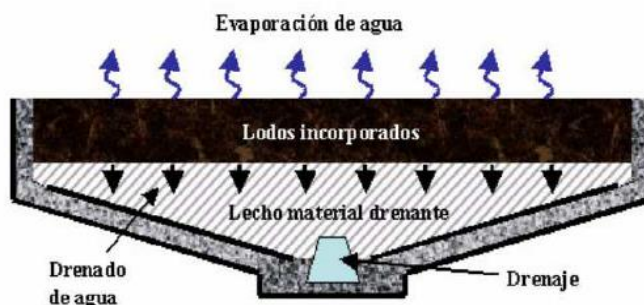
La deshidratación consiste en la reducción del volumen de los lodos eliminando el líquido presente en él. Puede producirse de manera natural (mediante lechos de secado, secado solar) durante largos periodos de tiempo o puede producirse de manera mecánica (mediante filtros prensa o centrifugas), lo cual acorta el tiempo de deshidratado, pero se manejan cantidades más pequeñas de lodo y es más costoso. Por esta razón, durante la elección del método de deshidratación es importante considerar aspectos como: cantidad y estructura del lodo, disponibilidad de espacio, normatividad vigente y cantidad de personal (Córdova, 2012).

Los sistemas de deshidratación más utilizados son: secado natural, lechos de secado, centrifugación, filtros al vacío, filtros prensa y filtro banda.

3.2.3.1 Sistemas de secado natural. El secado de los lodos se da por la separación del sobrenadante y aguas lluvias principalmente por la evaporación. Este sistema tiene la ventaja su bajo costo de implementación, siempre y cuando se disponga del área suficiente. Dentro de sus desventajas esta la alta dependencia de las condiciones climáticas y un alto requerimiento de mano de obra para la remoción del lodo (Córdova, 2012).

Figura 6.

Sistema de secado natural



Nota. Estudio para el tratamiento, manejo y disposición final de lodos generados en plantas de tratamiento de agua potable (Córdova, 2012)

3.2.3.2 Lechos de secado. Es el método más utilizado por su bajo costo, el escaso mantenimiento que necesitan y el elevado contenido de sólidos en el producto final. En estos, la remoción de agua se da por los mismos mecanismos que en el secado natural, agregándose el

drenaje gravitacional a través de arena, grava y tuberías de recolección. Existen cuatro tipos de lechos de secado: convencionales de arena, pavimentadas, de medio artificial y por vacío (Córdova, 2012).

3.2.3.3 Centrifugación. Tiene lugar en un decantador cilíndrico que gira a gran velocidad, lo cual origina un campo centrifugo equivalente a varios miles de veces la fuerza de la gravedad, haciendo que el lodo precipite en las paredes interiores del cilindro. La entrada de lodo tiene lugar por un tubo central. Un tornillo helicoidal va arrastrando hacia el exterior el lodo mientras el agua clarificada sale por el extremo opuesto (Ramírez, 2008).

3.2.3.4 Filtros al vacío. La remoción de agua se da por el vacío creado en un tambor recubierto con un tejido filtrante. Al girar parcialmente sumergido en un recipiente con lodo acondicionado, el vacío provoca un flujo de líquido hacia el interior del cilindro permitiendo la retención de las partículas de mayor tamaño en los poros del material filtrante (Garcés Arancibia et al., 2004).

3.2.3.5 Filtro banda. La remoción de agua consiste en tres etapas: un acondicionamiento químico, usualmente con polielectrolito orgánico, un drenaje y un espesamiento por gravedad (Garcés Arancibia et al., 2004). Posteriormente se realiza la compresión del lodo la cual consiste en una banda continua de tela filtrante que pasa a través de unos rodillos giratorios. El lodo se vierte de forma continua sobre la banda y al pasar por los rodillos es comprimido y una placa

rascadora va separando el lodo deshidratado de la banda. En estos filtros se consiguen concentraciones de hasta 20% en materia seca (Ramírez, 2008).

3.2.3.6 Filtro prensa. El lodo previamente acondicionado, generalmente con cal, se introduce en unas cámaras recubiertas con tejido filtrante, definidas entre dos placas adyacentes. Al continuar bombeando, se fuerza un flujo a través de la torta que se forma al interior de las cámaras por la acumulación de sólidos en la superficie del tejido. Cuando se ocupa el volumen disponible el bombeo se detiene, permitiendo la salida de la torta de lodos deshidratados, se ensambla la prensa y vuelve a iniciar el ciclo (Garcés Arancibia et al., 2004). El funcionamiento es discontinuo y muy laborioso pero se obtiene un lodo bastante seco, alrededor del 30% en materia seca (Ramírez, 2008).

3.2.4 Secado

El secado consiste en la eliminación de la humedad, a través de la evaporación del agua que existe en el lodo. Mediante este proceso se consigue reducir el volumen de los lodos, facilitando el transporte y disposición final. El secado se realiza mediante varios métodos basados en contacto, convección o radiación. Para la escogencia del método adecuado se debe tener en cuenta condiciones como: adherencia segura, compatibilidad medio ambiental, cantidad de lodo y costos operacionales (Córdova, 2012).

3.2.4.1 Secado por convección. Consiste en el tratamiento de los lodos con aire caliente. Se calienta el aire ambiental con ayuda de un calentador o, a su vez, con un intercambiador de calor. Este aire entra en contacto con el lodo en un tambor o cinturón de secado (Córdova, 2012).

3.2.4.2 Secado por radiación. Consiste en suministrar calor a los lodos mediante radiación solar o por calentamiento de elementos infrarrojo (Córdova, 2012).

3.2.5 Disposición final

Generalmente, el destino final de este tipo de lodos suele ser en vertederos controlados como relleno de terrenos o en procesos de compostaje junto con el lodo proveniente del tratamiento del agua residual. Sin embargo, algunos de estos lodos, dado a su alto contenido de arcilla, suelen emplearse en la fabricación de productos cerámicos (ladrillos, bases para baldosas y azulejos, etc.) y también son utilizados por su alto contenido de metales en el tratamiento de agua para la recuperación y reutilización del coagulante (Córdova, 2012).

4. Formación de los lodos en una planta de tratamiento de agua residual

Los lodos provenientes de las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) son el producto de la concentración de sólidos en el agua residual, o de la formación de nuevos sólidos suspendidos resultantes de los sólidos disueltos (Amador-Díaz et al., 2015). Se pueden generar durante el tratamiento de las aguas residuales domésticas o de las aguas industriales. Donde se

conoce como *Aguas Residuales Domesticas (ARD)* a los líquidos provenientes de las viviendas o residencias, edificios comerciales e instituciones y se conoce como *Aguas Residuales Industriales (ARI)* a las aguas residuales provenientes de las descargas industriales (Toro & Guerrero, 2013).

Son subproductos líquidos, solidos o semisólidos que contienen gran cantidad de materia orgánica, microorganismos, macro y micronutrientes, metales pesados y agua. Sus características dependen en gran medida del origen de las aguas residuales, el proceso de tratamiento y la época del año. Y sus propiedades y la viabilidad de la alternativa de uso están estrechamente conectados a los procesos empleados en el tratamiento del agua residual (Amador-Díaz et al., 2015). En la tabla 1 se observan los valores característicos de los parámetros más frecuentes en los lodos provenientes del tratamiento de aguas residuales.

Tabla 1.

Valores característicos de los parámetros más frecuentemente estudiados en los lodos

Parámetros	Máximo	Mínimo
DQO total (mg/L)	90000	6000
DBO total (mg/L)	30000	2000
Nitrógeno total (mg/L)	1500	200
Fósforo total (mg/L)	300	40
Sólidos suspendidos totales (mg/L)	100000	7000
Sólidos suspendidos volátiles (mg/L)	60000	4000
pH	8,5	7,0

Coliformes fecales (NMP/100ml)	10^8	10^6
---------------------------------------	--------	--------

Nota. Tratamiento de lodos, generalidades y aplicaciones (Amador-Díaz et al., 2015)

Los contaminantes contenidos en las aguas residuales pasan a las plantas de tratamiento donde se eliminan en gran medida por la absorción en el lodo producto del tratamiento fisicoquímico o biológico (García, 2006). La cantidad de lodos producidos depende de varios factores: eficiencia del tratamiento primario, relación de SST, DBO, cantidad de sustrato soluble, remoción de nutrientes y criterios de diseño del tratamiento (Metcalf & Eddy, 1995).

4.1 Etapas del tratamiento de las aguas residuales

El sistema de tratamiento de las aguas residuales es seleccionado de acuerdo a los objetivos que se fijan en la remoción de los contaminantes. Los diferentes sistemas de tratamiento implican procesos biológicos, procesos fisicoquímicos y en ocasión presentan ambos. Por lo general se divide en cuatro etapas, una seguida de la otra inmediatamente después, empezando por el tratamiento preliminar, seguido del tratamiento primario, tratamiento secundario y finalizando con el tratamiento terciario (Figura 6) (Toro & Guerrero, 2013). En la tabla 2 se puede evidenciar los diferentes tipos de tratamiento más usados en cada etapa del tratamiento de aguas residuales.

Tabla 2.

Método de tratamiento de las aguas residuales

Nivel de	Proceso	Objetivo de	Tipo de tratamiento
-----------------	----------------	--------------------	----------------------------

tratamiento		remoción	
Preliminar	Físico	Sólidos	Rejas
		suspendidos y	Tamices
		material flotante	Trituradores
		grueso	Cajas de arena
			Retención de grasa
			Homogenizadores
			Reguladores de caudal
Primario	Procesos físicos, químicos y bioquímicos	Sólidos en	Sedimentadores primarios
		suspensión,	Sistemas de flotación
		sedimentables,	Neutralización
		grasas y	Precipitación
		sustancias	Oxidación
		disueltas en	Fosas sépticas
		general	Tanques Imhoff
Secundario	Tratamiento biológico y/o bioquímico	Remoción de	Lagunas de estabilización
		materia orgánica	Zanjas de oxidación
		disuelta y en	Filtros biológicos
		suspensión	UASB

		biodegradables y nutrientes	FAFA
Terciario	Tratamiento	Remoción de	Coagulación
	químico y/o	materia orgánica	Floculación
	bioquímico	e inorgánica	Descarbonatación
		disuelta y	Ablandamiento
		eliminación de	Precipitación
		patógenos	Desinfección
			Biofiltro y lagunas con macrofitas

Nota: Aplicación de los lodos del sistema de tratamiento de aguas residuales de la compañía cervecera de Nicaragua (Palacios Gonzáles, 2007)

4.1.1 Pretratamiento

En el tratamiento preliminar se utiliza una serie de unidades encargadas de modificar la distribución del tamaño de las partículas presentes en el agua residual. Consta de un tamizado grueso, dilaceración, remoción de arenas, remoción de grasas y aceites, homogenización de caudales y remoción de sólidos suspendidos totales (Palacios Gonzáles, 2007).

4.1.2 Tratamiento primario

Tiene como función la remoción de materia en suspensión y flotante. El sistema más común es el sedimentador que bajo buenas condiciones de operación, puede remover hasta el 60% de los sólidos en suspensión, y el 30% de la DBO. Los decantadores son unidades de tratamiento primario destinadas a remover sólidos sedimentables que incluyen partículas granulares y muchas floculentas (Palacios Gonzáles, 2007).

4.1.3 Tratamiento secundario

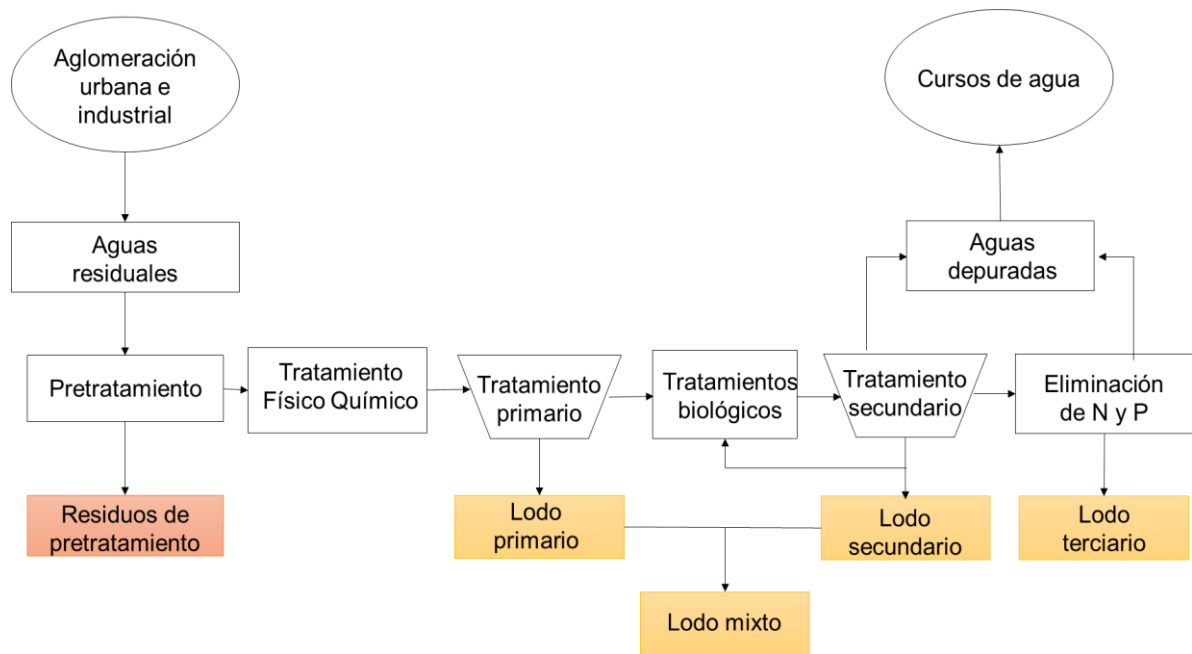
El tratamiento secundario reduce la materia orgánica presente en el agua. Generalmente se usan procesos biológicos para el tratamiento de líquidos domésticos. El tratamiento consiste básicamente en aclimatar una flora bacteriana que utilice la materia orgánica como alimento, convirtiéndola en gases como el CO₂ y en tejido celular de las bacterias, que puede ser removido por sedimentación (Palacios Gonzáles, 2007).

4.1.4 Tratamiento terciario

Constituye un complemento a la depuración del agua residual. Los tratamientos empleados buscan reducir los sólidos en suspensión y la parte orgánica asociada, reducir la DBO y DQO solubles, reducir contenido de fósforo y/o nitrógeno, eliminar microorganismos patógenos, eliminar detergentes o tóxicos no biodegradables (Palacios Gonzáles, 2007).

Figura 7.

Esquema del tratamiento de aguas residuales y la clasificación de los lodos



Nota. Evaluación de la variación temporal de los constituyentes de los lodos generados en diferentes plantas de tratamiento del sector industrial (Santana, 2018).

4.2 Tipos de lodos en el tratamiento de agua residual

Los lodos que se producen en el tratamiento de aguas residuales son principalmente los siguientes:

4.2.1 Lodo primario

Se produce durante los procesos de tratamiento primario. Consiste en productos no disueltos de las aguas residuales. La composición generalmente contiene una gran cantidad de materia orgánica, vegetales, frutas, papel, etc. Se caracteriza por ser un fluido denso con un porcentaje de agua que varía entre 92% y 96% (Molina & Bermúdez, 2016).

4.2.2 Lodo activado

El lodo generalmente está en forma de floculos que contienen biomasa viva y muerta, además de partes minerales y orgánica absorbida y almacenada. El comportamiento de sedimentación de los flóculos de los lodos activados es de gran importancia para el funcionamiento de la planta de tratamiento biológico. El volumen requerido de lodo activado es devuelto de nuevo al tanque de aireación (Molina & Bermúdez, 2016).

4.2.3 Lodo activado de retorno

Proviene del tanque de aireación biológica al clarificador final. Los flóculos sedimentan al fondo y pueden separarse del agua limpia residual. La mayoría del lodo es devuelto al tanque de aireación (Molina & Bermúdez, 2016).

4.2.4 Lodo secundario

En el proceso de tratamiento es conveniente alcanzar una vida del lodo constante; para ello, la biomasa en exceso debe eliminarse. El lodo secundario es rico en lodo activo (Molina & Bermúdez, 2016).

4.2.5 Lodo terciario

Se produce durante los procesos de tratamiento posteriores con adición de agentes floculantes (Molina & Bermúdez, 2016).

En la figura 6 se puede observar los tipos de lodos nombrados anteriormente y su procedencia durante el tratamiento de aguas residuales.

4.3 Tratamiento de los lodos en una planta de tratamiento de agua residual

El lodo proveniente de la sedimentación y de los procesos de tratamiento biológico debe tratarse antes de disponer de él. En general el tratamiento de los lodos residuales se encuentra enfocado en la reducción de volumen y en su estabilización (Palacios Gonzáles, 2007). Entre los procesos más comunes utilizados se encuentran el espesamiento, estabilización, acondicionamiento, deshidratación, incineración y disposición final (Figura 7).

La selección del tipo de tratamiento depende de varios factores, entre ellos la cantidad y calidad de los lodos, las condiciones particulares del sitio y la situación financiera de la empresa (García, 2006).

4.3.1 Espesamiento

Es un proceso que se utiliza para aumentar la fracción sólida del lodo mediante la reducción de la fracción líquida del mismo, por lo tanto, se conseguiría reducir el volumen del lodo a una quinta parte (Fernando, 2014). El método de espesamiento permite lograr una homogenización de los lodos procedentes de los decantadores y procesos primarios y secundarios (Carreño, 2019). La reducción del volumen es muy beneficiosa porque permite

reducir la capacidad de tanques y equipos necesarios como la cantidad de reactivos químicos necesarios para el acondicionamiento y la cantidad de calor necesario para los digestores (Fernando, 2014).

Suele llevarse a cabo mediante procesos físicos, y los más utilizados son: espesamiento por gravedad, por centrifugación y por flotación (Fernando, 2014).

4.3.1.1 Espesamiento por gravedad. Generalmente, se lleva a cabo en tanques circulares de diseño similar al de un tanque sedimentador. El lodo diluido se conduce por una cámara de alimentación central. El lodo alimentado se sedimenta y compacta y el lodo espesado se extrae por la parte inferior donde se bombea a los digestores. Mientras que el sobrenadante que se origina es devuelto al sedimentador primario (Fernando, 2014). Este proceso es más efectivo en el tratamiento del lodo primario, fisicoquímicos y mixtos que decantan bien por gravedad. Los lodos activados decantan lentamente (Mejía & Alzate, 2018).

4.3.1.2 Espesamiento por centrifugación. Este proceso es utilizado tanto para espesar como para deshidratarlos y limitado para el espesado de los lodos activados. Implica la sedimentación de las partículas del lodo bajo la influencia de fuerzas centrifugas (Fernando, 2014). Suelen requerir equipos caros que requieren medidas adecuadas de mantenimiento (Mejía & Alzate, 2018).

4.3.1.3 Espesamiento por flotación. En este proceso se introduce aire en una solución que se mantiene a una presión determinada. Cuando se despresuriza la solución, el aire disuelto

en forma de burbujas finamente divididas arrastran el lodo hasta la superficie, en donde es recogido con un desnatador (Fernando, 2014). Este tipo de sistema está indicado para el espesado de lodos gelatinosos como los lodos activados debido a su baja capacidad de sedimentación (Mejía & Alzate, 2018).

4.3.2 Estabilización

La estabilización de los lodos se lleva a cabo con el objetivo de reducir la presencia de patógenos, eliminar olores desagradables, inhibir, reducir o eliminar su potencial de putrefacción (Palacios Gonzáles, 2007). Se permite lograr una homogenización de los lodos y reducir su volumen.

Entre las tecnologías disponibles se incluyen: estabilización con cal, tratamiento térmico, digestión anaerobia, digestión aerobia y compostaje.

4.3.2.1 Estabilización con cal. Es un proceso sencillo que permite eliminar olores y patógenos mediante la creación de un pH igual a 12 durante más de dos horas. Los microorganismos que producen gases y malos olores son destruidos o inactivados, así como los patógenos. Mejora las características de secado y sedimentación del lodo, pero reduce el poder fertilizante del lodo estabilizado en comparación con el lodo digerido anaeróbicamente y aumenta su alcalinidad (Palacios Gonzáles, 2007).

4.3.2.2 Tratamiento térmico. El tratamiento térmico sirve como proceso de estabilización y acondicionamiento. Durante el proceso el lodo se calienta en un depósito a

temperaturas de hasta 260°C y presiones de hasta 2.760 kN/m², durante un corto periodo de tiempo (aproximadamente 30 minutos) (Palacios Gonzáles, 2007).

El tratamiento térmico permite que los sólidos sean aptos para la deshidratación sin necesidad de emplear reactivos químicos. La actividad térmica produce la hidrólisis de la materia proteica, lo cual provoca la destrucción celular y la liberación de compuestos solubles y nitrógeno amoniacal (Metcalf & Eddy, 1995).

4.3.2.3 Digestión anaeróbica. Es uno de los tratamientos más antiguos en la estabilización de lodos. En este proceso la materia orgánica e inorgánica se descompone por la acción de los microorganismos en la ausencia del oxígeno y se produce metano y dióxido de carbono. Se lleva a cabo en un reactor completamente cerrado donde los lodos se introducen de forma continua o intermitente y permanecen en su interior durante periodos de tiempo variables (Hammeken Arana & Romero García, 2005).

Aproximadamente del 30 al 35% de los sólidos de los lodos son descompuestos y por cada kilogramo de materia orgánica destruida, se produce cerca de 1 m³ de metano. Durante la gestión anaeróbica, gran parte del contenido de nitrógeno y de fósforo se libera de forma soluble, de manera que el valor fertilizante está sobre todo en la fase líquida (Palacios Gonzáles, 2007).

Los lodos estabilizados que se extraen son negros con un ligero olor a alquitrán, tienen un bajo contenido en materia orgánica y patógena y no es putrescible, suficientemente estable para poder ser utilizado como fertilizante (Palacios Gonzáles, 2007).

4.3.2.4 Digestión aeróbica. Este proceso es similar al proceso de lodos activados. Conforme se agota el suministro de sustrato disponible, es decir su alimento, los microorganismos empiezan a consumir su propio protoplasma, lo que se denomina 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. En la práctica solo se puede oxidar entre el 75 y 80% del tejido celular, puesto que también está conformado por compuestos inertes y compuesto inorgánicos no biodegradables (Fernando, 2014).

En las plantas pequeñas se usa con mayor frecuencia ya que es una operación relativamente fácil, los costos son menores, se consiguen menores concentraciones de DBO en el líquido sobrenadante y se obtiene un producto final biológicamente estable y sin olores (Palacios Gonzáles, 2007).

Por lo general se lleva a cabo en tanques de concreto abiertos y no calentados. Los factores que deben tomarse en cuenta son la temperatura, el tiempo de retención hidráulica, la carga de sólidos, las necesidades de oxígeno, el requerimiento de aire y la necesidad de energía para la mezcla (Palacios Gonzáles, 2007). Dentro de sus desventajas están que requiere de un mayor costo energético asociado al suministro de oxígeno necesario (Fernando, 2014).

4.3.2.5 Compostaje. El compostaje es un proceso en que la materia orgánica sufre una degradación biológica hasta alcanzar un producto final estable (Metcalf & Eddy, 1995). Esta descomposición es un proceso en condiciones controladas; así como la temperatura, humedad y contenido de oxígeno, para diferenciar esta descomposición de la putrefacción incontrolada que tiene lugar en vertederos u otras disposiciones finales (Fernando, 2014)

El producto final es un material tipo humus, higiénico, de color oscuro, inodoro y estable (Fernando, 2014). Aproximadamente el 20 o 30% de los sólidos volátiles se convierten en dióxido de carbono y agua. Conforme se produce la descomposición de la materia orgánica, el compost se calienta hasta alcanzar temperaturas situadas en el intervalo de pasteurización (50 a 70°C) lo cual permite la destrucción de organismos patógenos (Metcalf & Eddy, 1995).

El proceso puede llevarse a cabo por vía aerobia o anaerobia. Sin embargo, el anaerobio siempre va acompañado de malos olores que no se presentan por vía aerobia, por lo cual es poco común el compostaje anaerobio (Palacios Gonzáles, 2007).

4.3.3 Acondicionamiento

El acondicionamiento de los lodos permite liberar la mayor cantidad de agua posible de sus partículas para mejorar la eficiencia del proceso de deshidratación. Antes de ejecutar el proceso de deshidratación, el líquido debe drenarse, lo que permite obtener un lodo seco y poroso con una buena concentración de sólidos (Amador-Díaz et al., 2015). Los métodos más comunes implican la adición de reactivos químicos y el tratamiento térmico.

4.3.3.1 Acondicionamiento químico. El acondicionamiento químico permite reducir la humedad del lodo desde el 90-99% hasta el 65-85% dependiendo de la naturaleza de los sólidos a tratar. Los productos químicos que se utilizan incluyen cloruro férrico, la cal, la alúmina (Al_2O_3) y polímeros orgánicos. La adición de reactivos de acondicionamiento puede aumentar el contenido de sólidos secos. Los polímeros no provocan un aumento notable, mientras que las sales de hierro y la cal pueden provocar aumentos del 20-30 por 100 (Metcalf & Eddy, 1995).

4.3.3.2 Acondicionamiento térmico. El acondicionamiento térmico tiene la ventaja de esterilizar los lodos, destruyendo organismos patógenos. El proceso consiste en mantener por 20 a 30 minutos de 180 a 200°C y a una presión de 10 a 20 atmósferas (Palacios Gonzáles, 2007). El tratamiento térmico se emplea para la coagulación de los sólidos, romper la estructura de gel y destruir la afinidad al agua de los sólidos contenidos en el lodo (Metcalf & Eddy, 1995).

4.3.4 Deshidratación

La deshidratación es un método físico el cual consiste en reducir la mayor cantidad de agua contenida en los lodos, ya que estos contienen aproximadamente un 80% de humedad y así lograr el aumento del contenido de sólidos (Carreño, 2019). La reducción del contenido de agua se busca por alguna o varias de las siguientes razones: disminuir costos de transporte, facilidad de manipulación, aumentar el poder calorífico antes de la incineración, reducir la cantidad de material de enmienda antes del compostaje, evitar la generación de olores o reducir la producción de lixiviados antes de su evacuación a vertederos (Palacios Gonzáles, 2007)

Se utilizan varias técnicas para la eliminación de la humedad, algunas se basan en la evaporación y percolación naturales, mientras que otras utilizan medios físicos, asistidos mecánicamente, entre ellos se encuentran: la filtración, el prensado, la acción capilar, la extracción por vacío y la separación y compactación por centrifuga (Metcalf & Eddy, 1995).

4.3.5 Incineración

La incineración es un proceso en el que la fracción orgánica de los lodos se transforma en materia inerte. No se trata de un sistema de eliminación total, puesto que genera cenizas y gases, por lo cual no resuelve completamente el problema de disposición debido a que es necesario disponer de la ceniza residual. Produce una significativa reducción de peso y volumen del material original y puede ser tratado como combustible derivado de residuos si su poder calorífico es adecuado (Mendoza et al., 2009).

Las cenizas generadas en la incineración de los lodos pueden ser combinadas con otros materiales para producir ladrillos, briquetas, pavimentos de carreteras o como materia prima del cemento Portland (Palacios Gonzáles, 2007).

Si este tipo de transformación es utilizado de forma incontrolada puede originar problemas medioambientales debido a las características propias de los lodos que pueden favorecer la generación de sustancias tóxicas durante el proceso de combustión (Mendoza et al., 2009).

4.3.6 Disposición final

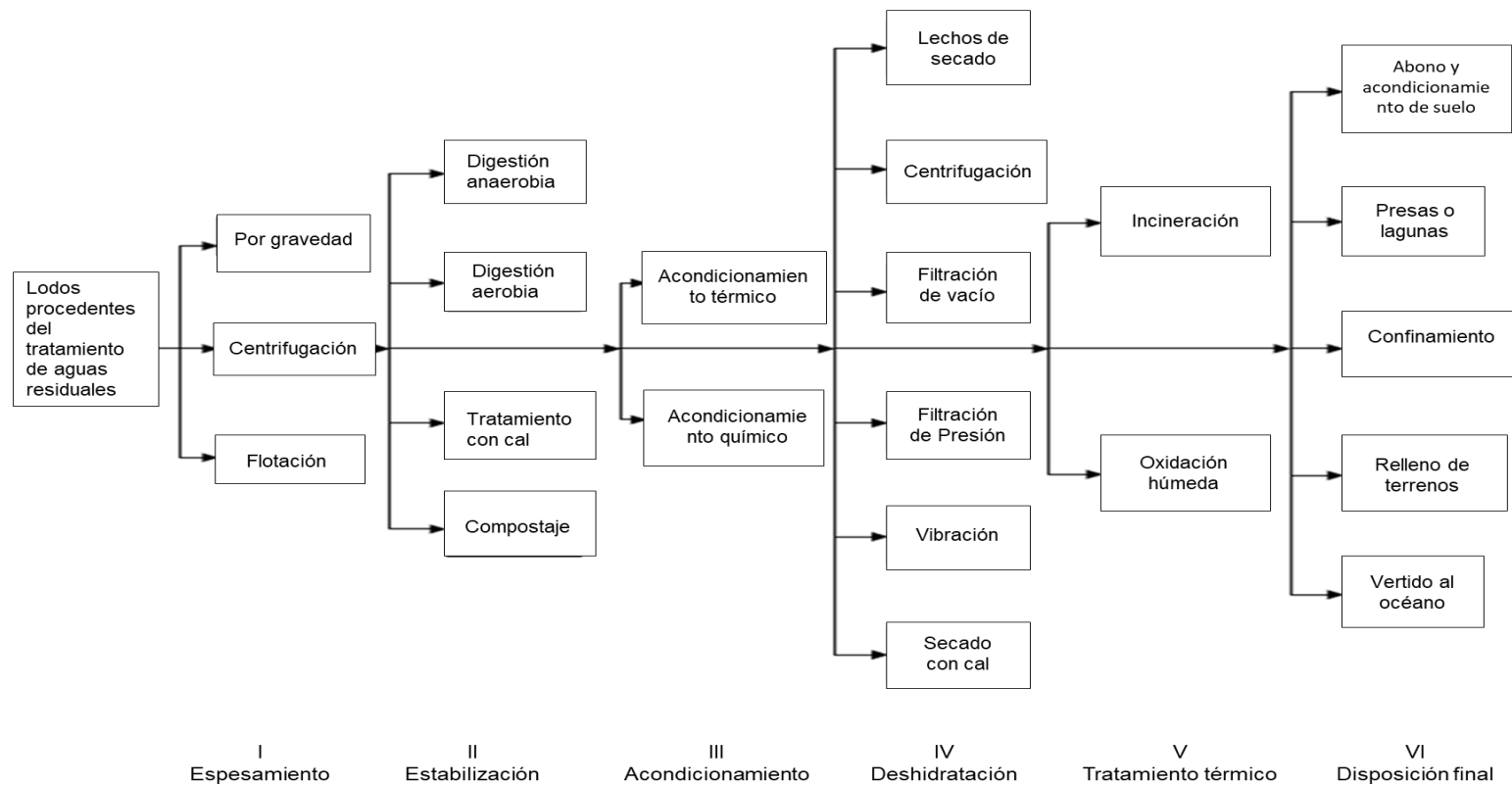
La evacuación final de los lodos que no se emplean para un uso beneficioso suelen implicar algún tipo de aplicación en el suelo. En las ciudades costeras, es común la evacuación de los lodos en el océano, sin embargo, esta práctica está quedando fuera de uso con los cambios en la normatividad de contaminación del agua (Metcalf & Eddy, 1995).

Además de esparcir el lodo sobre el suelo, existen otras opciones de evacuación final del lodo, entre las cuales se incluyen las lagunas y el transporte a rellenos sanitarios. El lodo

deshidratado se coloca como material de cobertura en los rellenos sanitarios como sitio de disposición final en donde se debe adicionar cal para la reducción de olores y generación de vectores. En los mono-rellenos (celdas para el manejo exclusivo de lodos residuales) se coloca sobre unas celdas agregándole un material de cobertura. Se debe considerar la disposición final en relleno sanitario o celdas de seguridad como última opción dentro del manejo de lodos(Carreño,2019)

Figura 8.

Etapas de tratamiento de los lodos residuales para su disposición final



Nota. Estudio del uso de los lodos generados en el tratamiento de agua potable y residual (Joya Prada, 2014)

5. Características fisicoquímicas y microbiológicas de los lodos provenientes del tratamiento de agua potable y residual industrial

5.1 Características fisicoquímicas y microbiológicas de los lodos provenientes del tratamiento de agua potable

Las características de los lodos generados en las plantas de tratamiento de agua potable varían de una planta a otra, sin embargo, poseen características básicas similares. Los lodos que se producen en los sedimentadores representan entre un 60 y 70% de los sólidos totales y en los filtros entre un 30 y 40%. El lodo está compuesto en su mayoría por agua y es tixotrópico, es decir, tienen características gelatinosas en reposo, pero líquidas en movimiento (Medina Carmona, 2017).

El lodo generado está compuesto de materia orgánica e inorgánica que se encuentra en estado sólido, líquido y gaseoso. El agua cruda de donde provienen generalmente contiene sustancias inertes como arcilla y arena, además de orgánicas como el plancton y otros microorganismos. Es por esta razón que los lodos varían en función de las características del agua de donde provienen y el tratamiento aplicado a esta (Pacheco Tuesca & Utria Lafaurie, 2019).

Tabla 3.

Valores promedio de los lodos provenientes de PTAP

Parámetro	Rangos promedio
Contenido de agua (%)	80-90
Sólidos totales (mg/L)	3000-15000
Sólidos suspendidos (%ST)	75-90
Sólidos volátiles (%ST)	20-35
DBO (mg/L)	30-100
pH	5-7

Nota. Evaluación a escala laboratorio de la viabilidad de recirculación de los lodos generados en el proceso de potabilización de agua de San Sebastián de Mariquita-Tolima (Medina Carmona, 2017)

*%ST porcentaje de los sólidos totales

Los coagulantes usados comúnmente en el tratamiento de potabilización del agua son las sales de aluminio (por ejemplo, $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$) o las sales de hierro (por ejemplo, $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, FeCl_2 , $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$). Estas sales se hidrolizan en agua para formar precipitados de hidróxido. Las impurezas coloidales y en suspensión como arena, limo, arcilla y otras partículas presentes en el agua son eliminadas y absorbidas en el lodo (T. Ahmad et al., 2016a). Por esta razón, la sílice, la alúmina, el óxido férrico y la cal constituyen el mayor porcentaje de componentes químicos presentes en el lodo. El contenido de humedad del lodo es generalmente superior al 80% en peso (Tabla 3) y su contenido de sólidos es bajo (alrededor de 1-6%), por ello

su disposición requiere el manejo de grandes volúmenes de lodo (Pacheco Tuesca & Utria Lafaurie, 2019).

Dependiendo de su composición fisicoquímica, pueden ser separados en lodos a base de Al y lodos a base de Fe (Comúnmente conocidos como alumbre y lodo férrico, respectivamente). En la tabla 4 se presentan los valores fisicoquímicos comúnmente encontrados en los lodos de alumbre y lodos férricos.

Tabla 4.

Composición química de los lodos de alumbre y lodos férricos

Parámetro	Lodos de alumbre	Lodos férricos
pH	6.5±0.3 ^a	7.0±1.3
Sólidos totales (mg/L)	2500-52,345	2132-5074
Al (mg/kg)	118,700±24,260	61,390±35,920
Fe (mg/kg)	37,000±19,740	220,900±32,200
Ca (mg/kg)	10,360±4299	Nd
Mg (mg/kg)	2407±572	Nd
Na (mg/kg)	355±142	Nd
K (mg/kg)	3547±582	Nd
S (mg/kg)	6763±2955	Nd
Mn (mg/kg)	2998±1122	1088±178
Zn (mg/kg)	98±31	36±4
Cu (mg/kg)	624±581	46±12

Ni (mg/kg)	28±10	64±14
Pb (mg/kg)	22±12	47±1
Cr (mg/kg)	20±7	38±4
Cd (mg/kg)	0.12±0.02	Nd
Hg (mg/kg)	0.46	Nd

Nota. Sustainable management of water treatment sludge through 3R concept (T. Ahmad et al., 2016b)

Nd-No determinado

^a los números son medias

El método simple de disposición final, donde son vertidos directamente a cuerpos hídricos o en vertederos, no es una solución adecuada debido a la posibilidad de contaminación del agua y suelo por los productos químicos utilizados en el tratamiento. La toxicidad de los lodos dependerá de diferentes factores como: las características del agua cruda, el coagulante utilizado y los posibles contaminantes removidos por el coagulante, así como las reacciones químicas que ocurran durante el proceso, el tiempo de retención del lodo en los sedimentadores y las características físicas, químicas y biológicas del mismo. Los lodos con altas concentraciones de aluminio al ser vertidos a los cuerpos hídricos con una velocidad baja de caudal pueden formar sedimentos que aíslan la capa bentónica (Cerón et al., 2007).

5.2 Características fisicoquímicas y microbiológicas de los lodos provenientes del tratamiento de agua residual industrial

Las características de los lodos provenientes del tratamiento de agua residual varían mucho dependiendo de su origen, es por esto que su caracterización fisicoquímica y microbiológica es de gran relevancia a la hora de darles un uso o disposición final. Están constituidos principalmente por las sustancias responsables del carácter desagradable de las aguas residuales.

En la industria, el agua es uno de los recursos naturales más usados diariamente, por lo tanto, se generan diferentes tipos de agua residual dependiendo de su uso: agua usada como medio de transporte, usada en procesos de lavado y enjuague, en procesos de transformación química usando el agua como disolvente, como subproducto de procesos físicos de filtración o destilación, como medio de transporte de calor, etc. (Toro & Guerrero, 2013). En la tabla 5 se mencionan los tipos de contaminantes presentes en las aguas residuales y sus efectos en el ambiente.

Tabla 5.

Contaminantes presentes en el agua residual y sus efectos

	Físicos		Químicos		Biológicos	
Contaminantes presentes en las aguas residuales	Incluyen	líquidos	Incluyen	compuestos	Incluyen	contaminantes
	insolubles o	solidos de	orgánicos	e	como hongos, bacterias	
	origen	natural	y	inorgánicos disueltos o	y	virus.
	diversos	productos	dispersos en el agua.	materias	son	Algunas

	sintéticos que, al entrar	inofensivas y otras
	en contacto con el	participan en la
	agua, interfieren en su	degradación de la
	composición.	materia orgánica
		contenida en el agua
Efectos	Mal olor, cambio de	Disminución de la
producidos por	color, enturbiamiento,	concentración
los	fermentación, cambio	necesaria de oxígeno
contaminantes	de temperatura	para la vida acuática
		enfermedades en el
		hombre.

Nota. 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 (Toro & Guerrero, 2013)

Uno de los problemas más frecuentes en el sector industrial es la contaminación de las aguas empleadas en sus procesos, es por esto que la mayoría de las empresas cuentan con una planta de tratamiento de aguas residuales. Al finalizar el tratamiento de las aguas residuales, todo el sedimento (lodo residual) se convierte en un reto para que las empresas realicen la mejor gestión sobre este residuo (Londoño & Carmona, 2016).

La generación de lodos es común en prácticamente todos los sectores industriales: textil, química y farmacéutica, pulpa y producción de papel, metalmecánica, electrotécnica,

procesamiento de alimentos, curtido del cuero, etc. (Londoño & Carmona, 2016). En la tabla 6 se pueden observar algunos valores reportados para lodos generados en algunas de estas industrias.

Los principales componentes de la fracción sólida de los lodos residuales son proteínas, grasas, urea, celulosa, sílice, nitrógeno, ácido fosfórico, hierro, óxido de calcio, óxido de aluminio, óxido de magnesio y potasio. También están presentes los metales pesados y una amplia variedad de minerales (Joya Prada, 2014).

Los metales pesados y residuos inorgánicos existentes en el agua residual se acumulan debido a los procesos fisicoquímicos implicados en el tratamiento, lo cual hace que los lodos sean muy diferentes a los lodos provenientes de plantas de potabilización. Los metales pesados como zinc (Zn), cobre (Cu), níquel (Ni), cadmio (Cd), plomo (Pb), mercurio (Hg) y cromo (Cr) son los principales elementos que restringen el uso de estos lodos (Joya Prada, 2014).

El volumen de lodo producido depende principalmente de las características del agua residual, del grado de tratamiento previo, del tiempo de sedimentación, de la densidad de los sólidos, del contenido de humedad, del tipo de equipo o método de remoción de lodos y la frecuencia con que se remueven (Toro & Guerrero, 2013). Al tratar estos lodos, se debe buscar la transformación de la materia orgánica e inorgánica en material inactivo, es decir, que no sea corrosivo, reactivo, explosivo, tóxico, inflamable o biológico-infeccioso, además de disminuir el volumen para una adecuada disposición final (Joya Prada, 2014).

Tabla 6.

Parámetros fisicoquímicos de los lodos reportados en diferentes industrias

Parámetro fisicoquímico	I1	I2	I3	I4	I5	Metales	I1	I2	I3	I4	I5
DBO (mg/g)	16.25	2.86	8.45	21.6	10.2	Arsénico (mg/kg)	4.14	59	107.67	3.7	0.321
DQO (mg/g)	2.35	2.04	8.2	1.7	0.2	Cadmio (mg/kg)	<0.07	1.18	13.97	<0.97	2.3
SST (mg/L)	0.09	0.01	0.08	0.1	88.3	Cobre (mg/kg)	740.3	26.25	61.77	2.4	52.1
Nitrógeno total (mg/g)	0.27	0.13	7.37	0	400	Cromo(mg/kg)	329.2	259.3	19.1	4.8	7.2
Fosforo total (mg/g)	0.09	0.07	2.72	0.0007	0.01	Mercurio (µg/kg)	83.4	241.45	67.14	<0.887	0.098
Conductividad (µs/cm)	28.4	2.99	5.17	67	4.8	Molibdeno (mg/kg)	49.13	28.03	42.8	<23.37	<44.32
pH	10.09	11.29	7.77	0.0047	0.04	Plomo (mg/kg)	649.95	<2.56	38.25	<14.52	35.7
Alcalinidad total (mg CaCO₃/g)	17827.87	5.55	3.31	2.1	0.3	Selenio (mg/kg)	126.14	28.51	30.66	<17.11	306.3
Acidez (mg CaCO₃/g)	0	0	0.0003	10.5	7.87	Zinc (mg/kg)	0.25	0.24	195.87	<10.39	19.9

Nota. Potential reuse of industrial sludge in the production of ceramic floor mortar (Rebolledo Lozano, 2020)

I1: Automotriz, I2: Metalurgia, I3: Comidas y bebidas, I4: Textil, I5: Papel y cartón

6. Marco normativo

6.1 Normatividad para lodos provenientes de plantas del tratamiento de agua potable

En la normatividad colombiana existen algunos decretos donde se hace mención a los lodos provenientes de plantas de tratamiento de agua potable en cuanto a su definición, tratamiento, vertimiento y disposición final, dentro de los cuales se encuentran los siguientes:

En el artículo 12 del decreto 1594 de 1984 se define lodo “a la suspensión de un sólido en un líquido proveniente de tratamiento de aguas, residuos líquidos u otros similares” y se establece en el artículo 70 del mismo que no podrán ser dispuestos en cuerpos de aguas superficiales, subterráneas, marinas, estuarinas o sistemas de alcantarillado y deben ser dispuestos de acuerdo a las normas legales de residuos sólidos. Sin embargo en el artículo 63 se establece una salvedad de los vertimientos de residuos líquidos en acuíferos, la cual dice que “Se permite la infiltración de residuos líquidos siempre y cuando no se afecte la calidad del agua del acuífero en condiciones tales que impidan los usos actuales potenciales” (Decreto 1594 de 1984) (Pacheco Jiménez & Varela Gómez, 2019).

La Resolución 0330 de 2017 en sus artículos 123,124,125 y 126 establece consideraciones a tener en cuenta en cuanto a la caracterización, evaluación, tratamiento y disposición final de los lodos generados en la potabilización de agua. Por medio de esta resolución se adopta el reglamento técnico para el sector de agua potable y saneamiento básico RAS en el cual se describe la gestión de estos subproductos de la potabilización.

Para el tratamiento y manejo de estos residuos el RAS 2000, en el capítulo A11.2.14 expone alternativas para el tratamiento y manejo de lodos que se originan en los procesos de sedimentación y filtración, producto de la operación de plantas de potabilización. Entre los que se encuentra la reintegración de los mismos a corrientes de agua o vertimientos en alcantarilla, de no poderse lo anterior, se deben trasladar a lagunas de acumulación donde son decantados y se elimina el agua de arrastre hasta dejarlos semisolidificados (RAS 2000) (Daza Márquez & Medina Sánchez, 2018).

Otra alternativa es concentrar el lodo, llevarlo a lagunas de secado para su solidificación y depositarlo en el sitio acordado, también se podrán secar mediante mecanismos mecánicos, extrayendo pasta y trasladarla hasta el lugar de acopio. En caso de realizar la descarga de lodos en un cuerpo de agua, se debe cumplir la normativa que establece el Decreto 1287 de 2014 (Daza Márquez & Medina Sánchez, 2018).

Los lodos que cumplan con los parámetros para ser dispuesto en vertederos o rellenos sanitario deberán cumplir con en el artículo 34 del decreto 2811 de 1974 donde se establecen las reglas para el manejo de los residuos sólidos, basuras, desechos, desperdicios y en general, de desechos de cualquier clase (Decreto 2811 de 1974).

6.2 Normatividad para lodos provenientes de plantas de tratamiento de agua residual

Las regulaciones de lodos en Colombia están reglamentadas a partir de su transformación previa a biosólido. Donde se entiende por biosólido al producto resultante de la estabilización biológica de la materia orgánica de los lodos generados en el tratamiento de aguas residuales, con características físicas, químicas y microbiológicas que permiten ser reutilizados con

restricción de acuerdo a la normatividad vigente. La disposición de los biosólidos demanda un manejo muy cuidadoso por los riesgos ambientales que pueden representar ante la posibilidad de contener sustancias contaminantes (Castillo, 2013).

La normatividad colombiana para el manejo y disposición final de los biosólidos incluye:

Tabla 7.

Normatividad colombiana para el manejo de lodos generados en el tratamiento de agua residual

Norma	Descripción
Decreto 1594 de 1984	En el artículo 70 donde se define el termino lodo por primera vez
RAS 2000	En el título C, indica el proceso de tratamiento de los lodos producidos en aguas duras y hervidas. Se define el término biosólido, pero no reglamenta la gestión de los mismos.
Decreto 1713 de 2002	Por el cual se reglamenta la Ley 142 de 1994, la Ley 632 de 2000 y la Ley 689 de 2001, en relación con la prestación del servicio público de aseo, y el Decreto Ley 2811 de 1974 y la Ley 99 de 1993 en relación con la Gestión Integral de Residuos Sólidos.
NTC 5167 de 2004	Esta norma tiene por objeto establecer los requisitos que deben cumplir y los ensayos a los cuales deben ser sometidos, los productos orgánicos usados como abonos o fertilizantes y como enmiendas de suelo.
Decreto 4741 de 2005	Por el cual se reglamenta parcialmente la prevención y manejo de los residuos o desechos peligrosos generados en el marco de la gestión

integral	
Decreto 1287 de 2014	Por el cual se establecen criterios para el uso de los biosólidos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales municipales.
Resolución 631 de 2015	Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones
Resolución 0330 de 2017 (RAS 2017)	Reglamenta los requisitos técnicos que se deben cumplir en las etapas de planeación, diseño, construcción, puesta en marcha, operación, mantenimiento y rehabilitación de la infraestructura relacionada con los servicios públicos domiciliarios de acueducto, alcantarillado y aseo. (Sección 5: Gestión de subproductos del tratamiento de agua residual).

Nota. *Aprovechamiento de los lodos de planta de tratamiento de aguas residuales en empresa láctea, Municipio de Cogua (Carreño, 2019)

** Valorización de los lodos provenientes de las plantas de tratamiento de aguas residuales (Mejía & Alzate, 2018)

En el decreto 4741 de 2005, se establece que los residuos que contienen uno o más de las sustancias nombradas en la tabla 8 en concentraciones superiores a las máximas permisibles será considerado un desecho peligroso por ser tóxico. Donde se entiende por “residuo peligroso” a los residuos que debido a su peligrosidad intrínseca (tóxico, corrosivo, reactivo, inflamable, explosivo, infeccioso, ecotóxico), pueden causar daños a la salud o el ambiente (Ministerio de

Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2007). Los biosólidos que superen los valores máximos permisibles deberán ser tratados y dispuestos como residuos peligrosos.

Tabla 8.

Características de peligrosidad de los residuos o desechos peligrosos

Parámetro	Unidades	Valores máximos permisibles
Arsénico	mg As/L	5.0
Bario	mg Ba/L	100.0
Cadmio	mg Cd/L	1.0
Cromo	mg Cu/L	5.0
Mercurio	mg Hg/L	0.2
Plata	mg Ag/L	5.0
Plomo	mg Pb/L	5.0
Selenio	mg Se/L	1.0

Nota. (Decreto 4741 de 2005)

En el decreto 1287 de 2014 se encuentran técnicas utilizadas para el tratamiento y manejo de los lodos residuales y se establecen los valores máximos permisibles para la categorización de los biosólidos para su uso.

6.2.1 Clasificación de los biosólidos según la normatividad colombiana

De acuerdo a los valores máximos permisibles mostrados en la tabla 9 la normatividad colombiana clasifica a los biosólidos en dos categorías: Categoría A y categoría B.

Tabla 9.

Valores máximos permisibles para la categorización del biosólido

Criterio	Parámetro	Unidad de medida	Categoría Biosólido	
			Valores máximos permisibles	
			A	B
Químicos-Metales Concentraciones máximas	Arsénico (As)	mg/kg de Biosólido (base seca)	20	40
	Cadmio (Cd)		8	40
	Cobre (Cu)		1000	1750
	Cromo (Cr)		1000	1500
	Mercurio (Hg)		10	20
	Molibdeno (Mb)		18	75
	Níquel (Ni)		80	420
	Plomo (Pb)		300	400
	Selenio (Se)		36	100
	Zinc (Zn)		2000	2800
Microbiológicos	Coliformes	Unidades	<1.00E (+3)	<2.00 E (+6)
	Fecales	Formadoras de		

	Colonias – UFC/g		
	de biosólido (base		
	seca)		
	Huevos de		
Huevos de	Helminthos viables/		
Helminthos	4g de biosólido	<1.0	<10.0
Viables	(base seca)		
	Unidades		
	Formadoras de		
Salmonella sp.	Colonias- UFC/ en	Ausencia	<1.00 E (+3)
	25 g de biosólido		
	(base seca)		
	Unidades		
	Formadoras de		
Virus Entéricos	Placas – UFP/ 4g	<1.0	-
	de Biosólido (base		
	seca)		

Los biosólidos de categoría A se consideran lodos sin restricciones para su aplicación en el suelo, de calidad excepcional, los cuales contienen pocos contaminantes y han sido tratados para eliminar esencialmente el contenido de patógenos. Los biosólidos de categoría B son lodos aptos para la aplicación en el suelo, con restricciones sanitarias de aplicación según tipo y localización de los suelos o cultivos (Amador-Díaz et al., 2015).

Teniendo en cuenta esta clasificación los biosólidos pueden destinarse para los siguientes usos:

Tabla 10.

Categoría, clasificación y uso de los biosólidos

Categoría A	Categoría B
a) En zonas verdes tales como cementerios, separadores viales, campos de golf y lotes vacíos.	a) En agricultura, se aplicará al suelo.
b) Como producto para uso en áreas privadas tales como jardines, antejardines, patios, plantas ornamentales y arborización.	b) En plantaciones forestales.
c) En agricultura.	c) En la recuperación, restauración o mejoramiento de suelos degradados.
d) Los mismos usos de la Categoría B.	d) Como insumo en procesos de elaboración de abonos o fertilizantes

orgánicos o productos acondicionadores para suelos a través de tratamientos físicos, químicos y biológicos que modifiquen su calidad original. Los procesos de elaboración y características de los productos finales y su uso, queda sujeto a la regulación establecida por el ICA.

- e) Para remediación de suelos contaminados, lechos biológicos para el tratamiento de emisiones y vertimientos, soporte físico y sustrato biológico en sistemas de filtración, absorción y adsorción.
 - f) Como insumo, en la fabricación de materiales de construcción.
 - g) En la estabilización de taludes de proyectos de la red vial nacional, red vial secundaria o terciaria.
 - h) En la operación de rellenos sanitarios como: cobertura diaria, cobertura
-

final de cierre y de clausura de
plataformas y en actividades de
revegetalización y paisajismo.

i) Actividades de revegetalización y
paisajismo de escombreras.

j) En procesos de valorización
energética.

Nota. (Decreto 1287 de 2014)

Los lodos que no cumplan con los valores máximos establecidos en la tabla 9 para su clasificación como categoría A y B, podrán usarse como cobertura diaria en la operación de los rellenos sanitarios, disponerse junto con los residuos sólidos municipales en rellenos sanitarios y de manera independientes en sitios autorizados o en procesos de valorización energética.

7. Alternativas de aprovechamiento para los lodos generados en las plantas de tratamiento de agua potable y residual en la industria

7.1 Alternativas de aprovechamiento de lodos generados en las plantas de tratamiento de agua potable

En la búsqueda bibliográfica realizada se identificaron nueve opciones de aprovechamiento de los lodos generados en PTAP, los cuales fueron clasificadas en cuatro categorías: uso en los procesos de tratamiento de aguas residuales, en la fabricación de ladrillos, productos cerámicos y materiales de construcción, como aditivo en la producción de biogás y aplicación en el suelo.

7.1.1 Uso en los procesos de tratamiento de aguas residuales

Los lodos de PTAP han sido utilizados para mejorar los procesos de tratamiento de las aguas residuales. Se ha demostrado que mejoran el acondicionamiento de los lodos y aumentan la eliminación de fósforo y otros contaminantes de las aguas residuales. Esto contribuye a minimizar costos debido a que disminuye en gran medida la dosis de coagulante requerida durante los procesos. Además de esto, representa una alternativa viable para minimizar el impacto ambiental que se genera durante la disposición final de estos. Dentro de los usos encontrados están: uso como absorbente de contaminantes y metales, como acondicionador y deshidratador, para la recuperación y reutilización del coagulante, como coagulante y uso como sustrato en los humedales artificiales.

7.1.1.1 Adsorbente de contaminantes y metales. El fósforo se considera un elemento clave que causa eutrofización en las masas de agua dulce. Las principales fuentes de fósforo en las masas de aguas superficiales son las aguas residuales municipales, los vertidos industriales y el estiércol de la producción ganadera. Por lo tanto, el control efectivo de las adiciones de fósforo a las aguas es un paso fundamental para controlar la eutrofización y sus efectos en el medio ambiente (Muisa et al., 2020).

Se sabe que el aluminio (Al) posee una fuerte afinidad con el fósforo y la mayoría de las plantas de tratamiento de agua en el mundo usan sulfato de aluminio o solo aluminio como coagulante. Por lo tanto, los lodos de alumbra generados en este tipo de plantas son una gran fuente de aluminio y pueden ser usados para la remoción de fósforo en la aguas residuales (Muisa et al., 2020).

Comparado con otros productos considerados como adsorbentes para la remoción del fósforo, los lodos de alumbre poseen una clara ventaja porque es un subproducto fácil y de libre acceso en pueblos, ciudades y regiones metropolitanas de todo el mundo que utilizan aguas superficiales como fuente de agua potable, y por lo tanto su disponibilidad está garantizada (Babatunde & Zhao, 2010).

En los últimos años diferentes autores han investigado las propiedades adsorbentes de los lodos de alumbra para la remoción de fósforo. Bal Krishna et al. (2016) encontraron que los lodos de alumbra resultan ser más eficientes que los lodos férricos, sin embargo, ambos presentan buenas eficiencias de remoción de fósforo (para los lodos de alumbra 96% y lodos férricos 82%). Muisa et al. (2020) encontraron que la capacidad de adsorción de lodos de alumbra varía de 2 a 43 mg P/g de lodo de alumbre y la adsorción de equilibrio se alcanza

generalmente entre 10 min y 24 h con agitación. Li et al. (2013) y Hou et al. (2018) también investigaron la capacidad de absorción de diferentes lodos provenientes de plantas de tratamiento de agua potable concluyendo que todas las muestras presentaron una gran capacidad de adsorción de P, en un rango de 2.06 a 6.06 mg P/ g de lodo. Además de esto afirman que, en comparación con otros sustratos, los lodos podrían tener una expectativa de vida muy larga y una muy buena eficiencia económica.

Los iones férricos o de aluminio amorfos que se encuentran abundantemente en los lodos provenientes de PTAP tienen mayor afinidad por los aniones, lo que los convierte en un potencial adsorbente para eliminar el fósforo de las aguas residuales (T. Ahmad et al., 2016b). Babatunde & Zhao (2010) afirman que la dinámica intrínseca en la adsorción del fósforo de soluciones acuosas por los lodos de alumbra tiene lugar a través de una relación de intercambio de superficie hasta que los sitios funcionales están completamente ocupados. En su estudio las más altas constantes de velocidad se obtuvieron a altas concentraciones de fósforo indicando que el lodo de alumbre adsorbe más fósforo por g/min a una concentración más alta.

En los últimos años también se ha investigado sobre el uso de los lodos provenientes de PTAP como absorbentes de diversos contaminantes como el fosfato y arseniato (Gibbons & Gagnon, 2011) y metales en las aguas residuales, entre ellos el cobre (Shahin et al., 2019), cadmio (Siswoyo et al., 2019),. Gibbons & Gagnon, (2011) encontraron que los lodos férricos son adsorbentes más fuertes de fosfatos o arseniato que los lodos de alumbre debido a la presencia de macroporos en los lodos férricos que podrían contribuir a una mayor adsorción, ya que las partículas de fosfato o arseniato puede difundirse en la estructura porosa de los sólidos.

Los metales pesados (tales como el cadmio, cromo, cobalto, níquel y mercurio) tienen propiedades toxicológicas y puede causar potenciales impactos en la salud humana y el medio ambiente debido a que no son degradables y extremadamente dañinos a concentraciones muy bajas. Varios métodos han sido probados para remover estos metales pesados de las aguas residuales (Reducción y precipitación, coagulación y flotación, intercambio de iones, tecnología de membranas y electrólisis), sin embargo, estos métodos tienen grandes desventajas como que son altamente costosos, tienen remoción incompleta y la generación de grandes cantidades de residuos tóxicos. Los lodos de PTAP pueden ser utilizados como material adsorbente para la eliminación de metales pesados debido a la presencia de varios óxidos en sus componentes y debido a su gran superficie (Shahin et al., 2019).

Autores como Abo-El-Enein et al. (2017) evaluaron exitosamente a los lodos de PTAP como un adsorbente eficiente para metales pesados como plomo (Pb), cadmio (Cd) y níquel (Ni) (en orden $Pb > Cd > Ni$), encontrando una adsorción extremadamente alta de plomo. Shahin et al. (2019) y Siswoyo et al. (2019) también hicieron uso de adsorbentes de alta eficiencia y bajo costo derivado de los lodos producidos en una planta de tratamiento de agua potable como material de remoción de cobre y cadmio.

Las condiciones de preparación y activación de los adsorbentes a base de lodos afectan fuertemente la capacidad de absorción y adherencia para la remoción de metales pesados. La capacidad de adsorción aumenta con un aumento en la temperatura de pirolisis debido al desarrollo de una alta superficie de porosidad a temperaturas de pirolisis más altas. La disparidad en la capacidad de adsorción de diferentes adsorbentes basados en lodos se debe al grado de carbonización y la naturaleza de los grupos funcionales en la superficie del adsorbente (Devi &

Saroha, 2017). También se ha reportado que el proceso de adsorción es altamente dependiente del pH de la solución y la mayor capacidad de adsorción fue encontrada en la región acida (T. Ahmad et al., 2016b).

7.1.1.2 Acondicionador y deshidratador. Los lodos de PTAR son difíciles de deshidratar, generalmente se suele utilizar acondicionamiento químico antes de la deshidratación mecánica. El acondicionamiento químico consiste en destruir el marco coloidal del lodo y flocular los flóculos del lodo mediante la adición de acondicionadores tales como oxido de calcio, cloruro férrico, poliacrilamida, etc. Estudios han mostrado que la aplicación de lodos de PTAP en el proceso de co-acondicionamiento y deshidratación de lodos provenientes del tratamiento de aguas residuales puede mejorar la tratabilidad de estos lodos (T. Ahmad et al., 2016b; J. Li et al., 2016).

J. Li et al. (2016) afirma que los lodos de alumbre mejoran la deshidratación de los lodos de aguas residuales porque el hidróxido de aluminio residual actúa como acondicionador químico y las materias granulares inorgánicas actúan como acondicionadores físicos. La presencia de hidróxido de aluminio mejora la velocidad de sedimentación y la deshidratación de los lodos biológicos. Esto provoca que la dosis de polímero requerida para la deshidratación del lodo se reduzca, en comparación con el lodo residual solo.

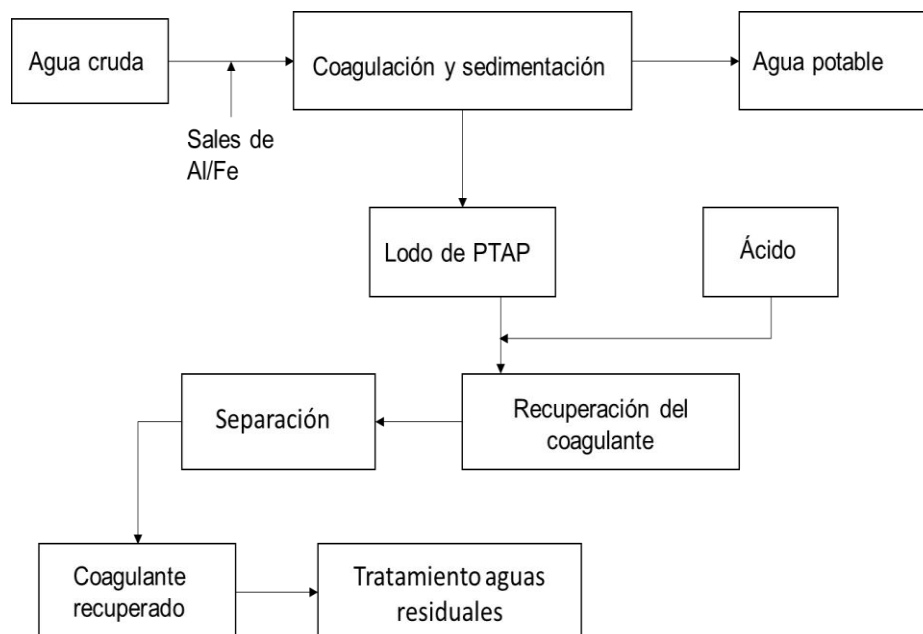
El uso de los lodos de alumbra no solo mejora la deshidratación de los lodos residuales, sino que también mejora de manera beneficiosa la eliminación de fosfato de agua de rechazo (hasta un 99%). Sin embargo, existen preocupaciones sobre los posibles efectos desventajosos de la aplicación de lodos para ayudar al acondicionamiento y deshidratación de los lodos tales como

la distancia de acarreo entre la planta de tratamiento de agua potable y la planta de tratamiento de aguas residuales, los beneficios del transporte de los lodos y la economía relacionada que pueden convertirse en un factor decisivo para su aplicación a gran escala (T. Ahmad et al., 2016b).

7.1.1.3 Recuperación y reutilización del coagulante. En los últimos años se han realizado intentos exitosos para recuperar los coagulantes de los lodos provenientes de PTAP y reutilizarlos para la eliminación de turbidez, DBO, DQO, sólidos en suspensión y fosfato de las aguas residuales. Diferentes técnicas han sido adoptadas para recuperar las sales de hierro o aluminio del precipitado, entre ellas: tratamiento ácido (digestión con H_2SO_4 y HCl), tratamiento alcalino (usando soda cáustica $NaOH$ o hidróxido de sodio $Ca(OH)_2$), intercambio de iones (a través de líquidos, resinas y membranas) y membranas impulsadas por presión como procesos de ultrafiltración y electrodiálisis. Las más comúnmente utilizada son el tratamiento ácido y la acidificación. (T. Ahmad et al., 2016b; Yang et al., 2014).

Figura 9.

Diagrama de flujo de generación y reutilización de lodo para la recuperación y reutilización del coagulante



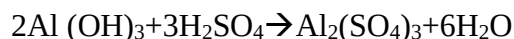
Nota. Reuse of acid coagulant-recovered drinking waterworks sludge residual to remove phosphorus from wastewater (Yang et al., 2014)

El sulfato de aluminio suele ser utilizado como coagulante en la potabilización del agua, el cual mediante el proceso es transformado en hidróxido de aluminio. El hidróxido de aluminio puede disolverse tanto en condiciones ácidas, como en condiciones básicas, por ser el aluminio un elemento anfótero, en consecuencia, la recuperación del aluminio pretende disolver el

hidróxido de aluminio al poner en contacto el lodo con un ácido o una base (Hammeken Arana & Romero García, 2005).

La recuperación y reutilización del coagulante en sí, reduce tanto el volumen de residuos que requieren eliminación como la demanda de coagulante fresco en un 70% (Keeley et al., 2012). Y. Xu et al. (2016) recalca que los lodos de alumbra contienen una gran porción de hidróxidos de aluminio insoluble y su reúso es una forma factible para la disposición final del lodo. Además de esto, las eficiencias de remoción de sólidos suspendidos (SS) y la demanda química de oxígeno (DQO) en las aguas residuales podrían mejorarse mediante la adición de lodos de alumbra.

En varios trabajos con lodos de plantas potabilizadoras se ha reportado el uso de soluciones básicas para la recuperación del aluminio como son el hidróxido de sodio (NaOH) consiguiendo un 80% de eficiencia de recuperación y también el hidróxido de calcio (Ca(OH)_2) con un 25% de recuperación siendo ambos un mecanismo aceptable dentro del reciclamiento del coagulante ya que no disuelve los demás metales presentes, pero el carbón orgánico disuelto aumenta considerablemente por esta vía, lo que limita las posibilidades de reutilizar el aluminio recuperado como coagulante, por lo que la opción más utilizada debido a su bajo costo y mayor eficiencia es la recuperación ácida con H_2SO_4 logrando hasta un 90% de eficiencia, siendo su única desventaja la cantidad de metales que a la par del aluminio se disuelven, tales como, óxidos e hidróxidos de hierro, manganeso, entre otros, lo que provoca su acumulación durante el reciclado constante (Estrada Brito, 2015). La adición de ácido sulfúrico para la recuperación del aluminio obedece la siguiente reacción:



Autores como Xu et al. (2009), Cheng et al. (2016) y Y. Xu et al. (2016) han utilizado con éxito los lodos de PTAP para la recuperación y reutilización del coagulante para la remoción de diferentes contaminantes en las aguas residuales. Cheng et al. (2016) utilizaron el coagulante recuperado de lodos de alumbré de una planta de potabilización para tratar las aguas residuales ricas en amonio y obtener un beneficio económico al producir alumbré de amonio. G. R. Xu et al. (2009) señala que la reutilización de estos coagulantes debe hacerse exclusivamente en el tratamiento de las aguas residuales debido a que los contaminantes y metales pesados aumentan durante la recuperación del coagulante y pueden afectar la calidad estricta del proceso de purificación del agua, además de esto, reporta un pH óptimo de 2.5 para la recuperación del coagulante.

Aunque, el proceso de recuperación puede ser un poco difícil, las pruebas a escala de laboratorio y de planta han demostrado la viabilidad práctica y los beneficios económicos de la reutilización del coagulante, debido a que, se podría reducir significativamente la dosis de coagulante fresco y por lo tanto el costo relacionado, especialmente en las plantas de tratamiento de aguas residuales. Además, el volumen de lodo reducido y las mejores características de deshidratación de lodo residual también reducen los costos en su eliminación (T. Ahmad et al., 2016b).

7.1.1.4 Uso como coagulante. En los últimos años se han hecho varios intentos para usar directamente los lodos de PTAP como coagulantes en el tratamiento de las aguas residuales

como una alternativa viable para minimizar el uso de coagulantes frescos e incrementar las eficiencias de remoción. Se ha demostrado que el lodo de alumbre se puede utilizar como coagulante para eliminar aceites, grasas, demanda química de oxígeno (DQO) y sólidos en suspensión (SS) (Dassanayake et al., 2015; Joya Prada, 2014).

Tarique Ahmad et al. (2016) investigó el reúso de los lodos de alumbra producidos a partir del agua cruda. Los lodos fueron tratados químicamente con ácido para producir un producto conocido como producto reactivo de lodo (SRP, por sus siglas en ingles) que fue utilizado directamente como coagulante para la eliminación de suspensiones coloidales del agua en condiciones variables. Los resultados mostraron que el porcentaje de remoción de la turbidez a pH entre 12-13 es excepcionalmente alto y la dosis óptima encontrada para el tratamiento del agua fue de 8 ml/L. La mayoría de los parámetros de calidad fueron los deseados, lo que demuestra que la preparación de SRP a partir del lodo es una alternativa viable de reúso para los lodos.

Jangkorn et al. (2011) también evaluaron la viabilidad de reutilizar el lodo de alumbre como coagulante para minimizar la dosis de aluminio fresca requerida para reducir los tensioactivos aniónicos mezclados y otros contaminantes. Los resultados mostraron que la adición de 1200 mg/L de lodo de alumbre como coagulante resultó en eficiencias de remoción de turbidez, DQO, tensioactivos aniónicos de 53.9%, 69.9% y 85.6%. Sin embargo, los sólidos suspendidos totales después del periodo de sedimentación fueron más altos que los de las aguas residuales originales alrededor del 63.8%. Con la adición de lodos de alumbra y aluminio fresco a concentraciones de 400 y 600 mg/L, respectivamente, las eficiencias de remoción para los

sólidos suspendidos totales, la turbiedad y la DQO fueron de 76.2%,99.5%y 92.8%, respectivamente.

Nair & Ahammed (2015) evaluó la viabilidad de reutilizar lodos de PTAP a base de cloruro de polialuminio como coagulante para el postratamiento del reactor anaerobio de flujo ascendente (UASB, por sus siglas en ingles). Los resultados mostraron que una alta eliminación de DQO y turbidez se podría obtener en condiciones óptimas con una dosis de 15 g/L y un pH de 9. Las eficiencias de remoción fueron 78% en la eliminación de fosfato, 84% en la eliminación de solidos suspendidos, 78% en la eliminación de DBO, además se observó una alta eliminación de Coliformes totales (99.7%).

También existen reportes de utilización de lodos como coagulantes en el tratamiento de aguas residuales industriales, entre ellos podemos encontrar a Mansour et al. (2020), quienes lograron exitosamente la utilización de lodos de PTAP para el tratamiento del agua residual producida durante el proceso de extracción del petróleo y así mejorar su recuperación. Dentro de sus ventajas recalcan el ahorro de agua, la reutilización del agua sin ninguna preocupación de formación de incrustaciones y la protección del medio ambiente.

Los reportes anteriores indican que la utilización de los lodos de PTAP en el proceso de coagulación de las aguas residuales es viable, lo que evita su eliminación y reduce su impacto en el medio ambiente. Su gran potencial de uso en procesos de tratamiento de aguas residuales industriales y municipales ayudaría a mejorar la eficiencia de la planta de tratamiento.

7.1.1.5 Como sustrato en humedales artificiales. Los humedales artificiales se han vuelto cada vez más populares siendo aplicados a nivel mundial para el tratamiento de diversos

tipos de aguas residuales. Se considera una técnica eficiente, natural, sostenible y ecológica debido a su bajo mantenimiento y bajos requisitos energéticos (T. Ahmad et al., 2016b; Dassanayake et al., 2015).

Los medios utilizados en los humedales artificiales se distinguen por varias propiedades físicas, químicas y biológicas que erradican contaminantes de las aguas residuales. Convencionalmente, se han utilizado varias combinaciones de suelo, arena, grava como sustratos. Varias investigaciones han revelado que los humedales basados en estos sustratos son capaces de cumplir con los requisitos de DBO, DQO y sólidos en suspensión. Sin embargo, se han informado eficiencias inconsistentes y más bajas en la eliminación de nutrientes, como el nitrógeno y el fósforo (T. Ahmad et al., 2016b; Dassanayake et al., 2015).

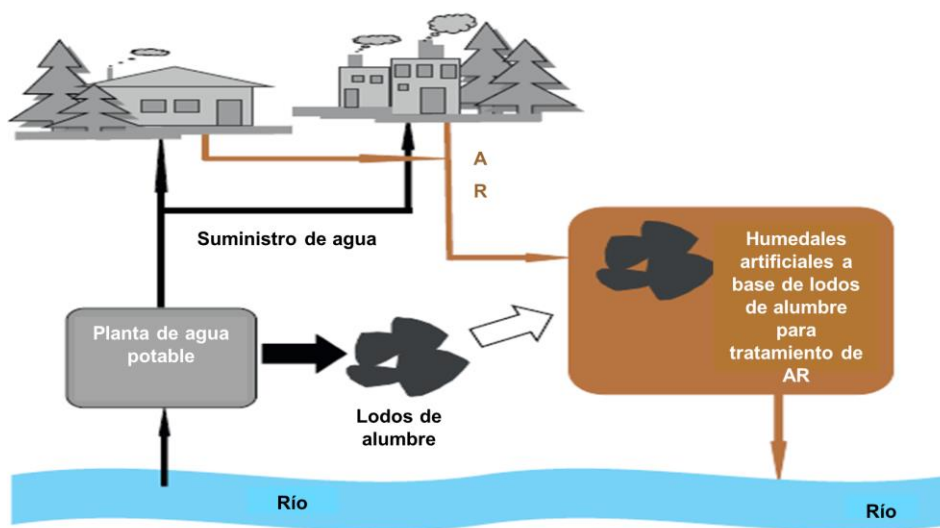
Por lo tanto, las investigaciones recientes se han enfocado en reemplazar el suelo, arena y grava tradicionalmente usados con algunos subproductos y desechos industriales como sustratos para la remoción de P y N en los humedales artificiales. Varios estudios han revelado que el lodo de alumbre tiene el potencial de ser utilizado en humedales artificiales para mejorar la reducción de fósforo y absorber otros contaminantes, ya que, como se ha dicho anteriormente, estos son ricos en aluminio, hierro y calcio, fuertes adsorbentes de contaminantes en las aguas residuales. Además, en comparación con otros subproductos industriales, el lodo de alumbre es único porque es un subproducto disponible a nivel local, fácil y ampliamente disponible en la mayoría de ciudades del mundo (T. Ahmad et al., 2016b; Dassanayake et al., 2015; Zhao et al., 2011).

Autores como Zhao et al. (2011) and Bai et al. (2014) han utilizado exitosamente los lodos de alumbre para la construcción de humedales artificiales. Zhao et al. (2011) evaluó la eficacia de los humedales artificiales a base de lodo de alumbre durante 1 año mediante un

sistema piloto a escala de campo. Los rangos de las eficiencias de eliminación mensuales para DBO5, DQO, nitrógeno total, fósforo total, y sólidos suspendidos fueron 57-84%, 36-84%, 11-78%, 75-94% y 46-83% respectivamente. Bai et al. (2014) afirman que los humedales artificiales a base de lodos de alumbre pueden eliminar los nutrientes de manera eficaz, a pesar de que se observaron ligeros aumentos en la concentración de $\text{NH}_4\text{-N}$, las concentraciones de contaminantes en los efluentes cumplieron con el estándar de descarga y la calidad de los efluentes se puede mejorar aún más con el aumento del tiempo de retención hidráulica.

Figura 10.

*Ilustración de la integración beneficiosa de los lodos de alumbre en el tratamiento de
aguas residuales*



Nota. Pilot field-scale demonstration of a novel alum sludge-based constructed wetland system for enhanced wastewater treatment (Zhao et al., 2011)

Otros autores como Gao et al. (2020) utilizaron los lodos de PTAP para la preparación de un material adsorbente para la eliminación de fósforo en humedales artificiales, el material mostró una gran capacidad de absorción y los autores afirman que este resuelve la difícil separación del lodo y el agua durante la eliminación de fósforo mediante adsorbente en polvo. Además, esto sugiere que el uso de los lodos de PTAP para la construcción de humedales artificiales es una opción interesante y viable para la disposición final de estos residuos.

7.1.2 Fabricación de ladrillos, productos cerámicos y materiales de construcción

Una alternativa para el destino final de los lodos lo constituye el sector de la construcción, que por sus grandes necesidades de materias primas puede absorber la totalidad de los lodos generados por el tratamiento de agua potable. En el sector de la construcción es aprovechado en la fabricación de cemento y Clinker, en la producción de ladrillos y productos cerámicos usándose como reemplazo parcial de uno de los materiales, lo que puede traer beneficios como la disposición ambiental segura para residuos potencialmente peligrosos, reducción de la contaminación hídrica causada por su vertimiento, menores gastos de energía y reducción de la vegetación comprometida en la extracción de arcilla (Benlalla et al., 2015; Salazar et al., 2014; Torres et al., 2012).

7.1.2.1 Fabricación de ladrillos y cerámicas. El ladrillo cerámico es el elemento básico del sector de la construcción. Las materias primas para su elaboración son materiales fundentes y estructurantes como arcillas y arenas respectivamente, las cuales deben adecuarse y seguir un procedimiento de moldeo, secado, cocción y finalmente, normalización en función de las normas

vigentes (que incluyen variables como resistencia a la compresión y absorción de agua) (Torres et al., 2012). El uso generalizado de arcilla natural para la fabricación de ladrillos ha creado una deficiencia preocupante de este material. Esta deficiencia ha llevado a los científicos a encontrar nuevos materiales o reciclar los residuos producidos por diversas actividades económicas (Heniegal et al., 2020).

Existe un potencial en los lodos de PTAP para ser utilizados durante el proceso de fabricación de ladrillos y cerámicas. El reciclaje de dichos residuos para fabricar productos cerámicos resulta atractivo desde un punto de vista tecnológico, económico y ambiental porque produce materiales con mayor resistencia a la flexión y proporciona un tratamiento adecuado de los lodos de la planta de tratamiento de agua potable (Benlalla et al., 2015).

Los ingredientes inorgánicos de los lodos de alumbre son similares a los de la arcilla, lo que facilita su adición a los ladrillos. Varios estudios han inspeccionado el uso de lodos de alumbre como reemplazo parcial o completo de la arcilla en el proceso de producción de ladrillos. Además, se han probado diferentes proporciones de lodo y arcilla encontrando que la proporción óptima es aproximadamente 50% de lodo en una mezcla de lodo y arcilla. Por otra parte, otros estudios recomiendan la incorporación de lodos de PTAP con otros materiales de desecho con alto contenido de sílice, como la ceniza de la cascara de arroz en la fabricación de ladrillos (Benlalla et al., 2015). Heniegal et al. (2020) afirma que algunos residuos agrícolas con alto contenido de sílice como la ceniza de paja de arroz, la ceniza de bagazo de caña de azúcar y la ceniza de paja de trigo son adecuados para incorporar con arcilla y lodos de PTAP en la fabricación de ladrillos.

Benlalla et al. (2015) desarrollaron un producto de arcilla con adición de lodos de alumbre como sustituto parcial de la arcilla. La proporción recomendada de lodo en el ladrillo por los autores es del 20% con un contenido de humedad óptimo del 30%, y cocido entre 900 y 930°C para producir un ladrillo de buena calidad. La caracterización medioambiental del producto indicó que se puede utilizar de forma segura. Torres et al. (2012) utilizaron el lodo proveniente de la etapa de sedimentación de procesos de potabilización de agua como reemplazo parcial de la arena e indicaron que un reemplazo de arena por lodo del 10% puede considerarse un porcentaje adecuado en la fabricación de ladrillos cerámicos, ya que con valores superiores se compromete significativamente la absorción de agua y la resistencia a la compresión.

Otros autores como Cremades et al. (2018) utilizaron los lodos de PTAP secados por aspersión en la fabricación de baldosas cerámicas. Los resultados mostraron que la alta porosidad del producto evita que se utilicen en el exterior como material no revestido (esmaltado, vidriado, etc.). Sin embargo, su elevado coeficiente dilatómico permite considerar la aplicabilidad de este material como corrector de tensiones térmicas en la producción de azulejos. Kizinievič & Kizinievič, (2017) investigaron las propiedades físicas y mecánicas, así como los parámetros estructurales de los productos cerámicos con adición de lodos de PTAP encontrando los mejores parámetros con la adición de 5% de lodos. Después de la adición del 5% de lodos en la mezcla de arcilla y una cocción a 1000°C, se obtuvieron cuerpos cerámicos con los siguientes parámetros: densidad 1807 kg/m³, resistencia a la compresión 48.5 MPa, contracción lineal 11.5%, absorción de agua 11%, porosidad 27.6%. Además, ambos autores afirman que el aditivo de lodos afecta el cuerpo cerámico como un pigmento que lo tiñe en un color rojo más oscuro y podría ser útil como aditivo colorante para producir colores ocre en ladrillos o piezas cerámicas.

7.1.2.2 Fabricación de cemento y materiales de cemento. Otros trabajos se han centrado en la incorporación de lodos tratados térmicamente como aditivos para la fabricación de cemento y materiales de cemento. Si los lodos son tratados térmicamente, los minerales presentes en ellos pierden cristalinidad y son capaces de liberar la sílice y alúmina reactivas, lo que conduce a materiales cementantes suplementarios por el consumo de Portlandita (Godoy et al., 2019). La inclusión de las cenizas de lodo en morteros como material cementante suplementario aumenta la porosidad que influye en todas las propiedades físicas y mecánicas, pero manteniendo inalterado el estado general de los morteros relacionados con el rendimiento en estado fresco y endurecido (Bohórquez González et al., 2020).

La actividad puzolánica es la capacidad de un material para reaccionar con el hidróxido de calcio para formar compuestos hidráulicos similares a los que se generan durante la hidratación del clinker de cemento. Los materiales puzolánicos cuando son incorporados en el cemento mitigan algunas de las desventajas que acompañan a los cementos portland tradicionales, como la liberación de gran cantidad de hidróxido de calcio, la posibilidad de reacciones de carácter expansivo y sobre todo el carácter fuertemente exotérmico de las reacciones de hidratación (Sánchez de Rojas et al., 2001). Varios estudios han mostrado actividad puzolánica en las cenizas de lodo que muestra su uso como aditivo mineral. La literatura describe que es posible conseguir la misma resistencia observada en el hormigón de referencia (100% cemento portland), reduciendo el consumo de cemento en el hormigón en 37-200 kg/m³ utilizando cenizas de lodo (Bohórquez González et al., 2020).

Bohórquez González et al. (2020) en sus resultados reportan que el 90% de la composición de las cenizas de lodo es SiO₂, Al₂O₃ y Fe₂O₃, que según ASTM C618-17a las

clasifica como material puzolánico clase F, mostrando el potencial para uso como material cementante. En su investigación, las muestras con una proporción de 10% de cenizas de lodo (tratadas térmicamente a una temperatura de 600°C) mostraron una resistencia a la compresión similar a la de la muestra control. Rabie et al. (2019) afirman que aunque el lodo de alumbra no es un material puzolánico natural se puede clasificar como de clase N (natural) según su composición química. Sus resultados también mostraron que el lodo de alumbre tiene una actividad puzolánica y por lo tanto puede ser usado para reemplazar el cemento en el concreto. Dentro de sus resultados, se encontró que se produce un aumento en la resistencia a la compresión de las mezclas de hormigón que contienen hasta un 15% de cenizas de lodo de alumbre activado.

El-Didamony et al. (2014) afirma que la resistencia a la compresión aumenta con un contenido de lodos por encima del 5% y disminuye cuando se aumenta hasta un 15% en peso. Concluyendo que este puede ser utilizado como un agente nucleante que proporciona mayor resistencia a la compresión en las diferentes etapas de curado. Resultados similares fueron obtenidos por Liu et al. (2020). En su investigación demostraron que los lodos de PTAP se puede utilizar para reemplazar agregados finos y que su contenido máximo podría ser de hasta el 10% debido a que la resistencia a la compresión disminuye significativamente cuando se utilizan porcentajes más altos (15% y 20%).

7.1.3 Como aditivo para la producción de Biogás

Para aumentar el rendimiento en una planta de biogás se han investigado diferentes enfoques como la co-digestión, el pretratamiento, el desarrollo de nuevas configuraciones de

reactores y el uso de aditivos para estimular el crecimiento de bacterias y disminuir los efectos inhibidores. En la digestión de desechos alimentarios que tienen baja concentración de oligoelementos, la adición de micronutrientes es incluso necesario. Los micro y macro nutrientes pueden estimular la producción de metano y ayudar a la estabilidad del proceso (Ebrahimi-Nik et al., 2018).

Ebrahimi-Nik et al. (2018) en su investigación plantearon la posibilidad de mejorar el rendimiento de biogás mediante la adición de lodos de tratamiento de agua potable. Los resultados obtenidos mostraron un efecto significativo sobre la producción de biometano en la digestión mesófila de los desechos alimentarios. Se obtuvo un rendimiento máximo de metano de 522 Nml/g al agregar 6 mg/kg de lodo. Lo que corresponde a una mejora del 59% en comparación con el ensayo de control. Además de esto, el tiempo de digestión fue menor con la adición del lodo.

Debido a lo reciente de la propuesta de Ebrahimi-Nik et al. (2018) es necesario un estudio más amplio de la posibilidad de utilizar lodos como aditivo en la producción de biogás, sin embargo, los resultados obtenidos son prometedores por el momento.

7.1.4 Aplicación en el suelo

Es muy importante mejorar la capacidad del suelo para sostener una cubierta vegetal, lo que se puede lograr modificando adecuadamente el suelo con mejoradores orgánicos e inorgánicos. La estabilización del suelo puede promover el restablecimiento de una cubierta vegetal en estos suelos al agregar nutrientes esenciales para el crecimiento de las plantas, aumentar el contenido de materia orgánica, elevar el pH, aumentar la capacidad de retención de

agua y hacer que los metales sean menos móviles cambiándolos a una forma disponible para las plantas (Alvarenga et al., 2018).

La aplicación de los lodos deshidratados en el suelo ha mejorado el crecimiento de las plantas, el pH y otras propiedades del suelo y en algunos casos, ha reducido el fósforo disponible de las plantas (Dube et al., 2018). Su aprovechamiento es viable ya que son ricos en arcilla y policloruro de aluminio que al ser aplicados en suelos sódicos y salinos en presencia de suficiente agua, provocarían un nivel de intercambio iónico con el sodio presente en el suelo, y mediante un buen sistema de drenaje se logra el lavado de una parte de los iones de sodio, mejorando así la estructura del suelo y su permeabilidad. Por esta razón, aunque generalmente aportan poco valor nutricional, pueden ser utilizados como mejoradores de suelos, es decir, para recuperar ciertas características del medio granular (Díaz Ibarra et al., 2010).

Díaz Ibarra et al. (2010) evaluaron la eficiencia de dos tipos de lodos de PTAP en el tratamiento de un suelo salino-sódico. Ambos tipos de lodos mostraron resultados positivos, lo que hace viable su uso en suelo con problemas de sodicidad para mejorar su permeabilidad. Caniani et al. (2013) evaluaron el uso de los lodos de PTAP para aplicaciones geo-ambientales como la construcción de barreras para vertederos y para la formación de "biosuelos". Los resultados mostraron que los lodos no presentan sustancias que puedan ser peligrosas para el medio ambiente, ya que se notaron un bajo riesgo de contaminación para el ser humano y bajas concentraciones de transferencia de contaminantes a los suelos y aguas subterráneas.

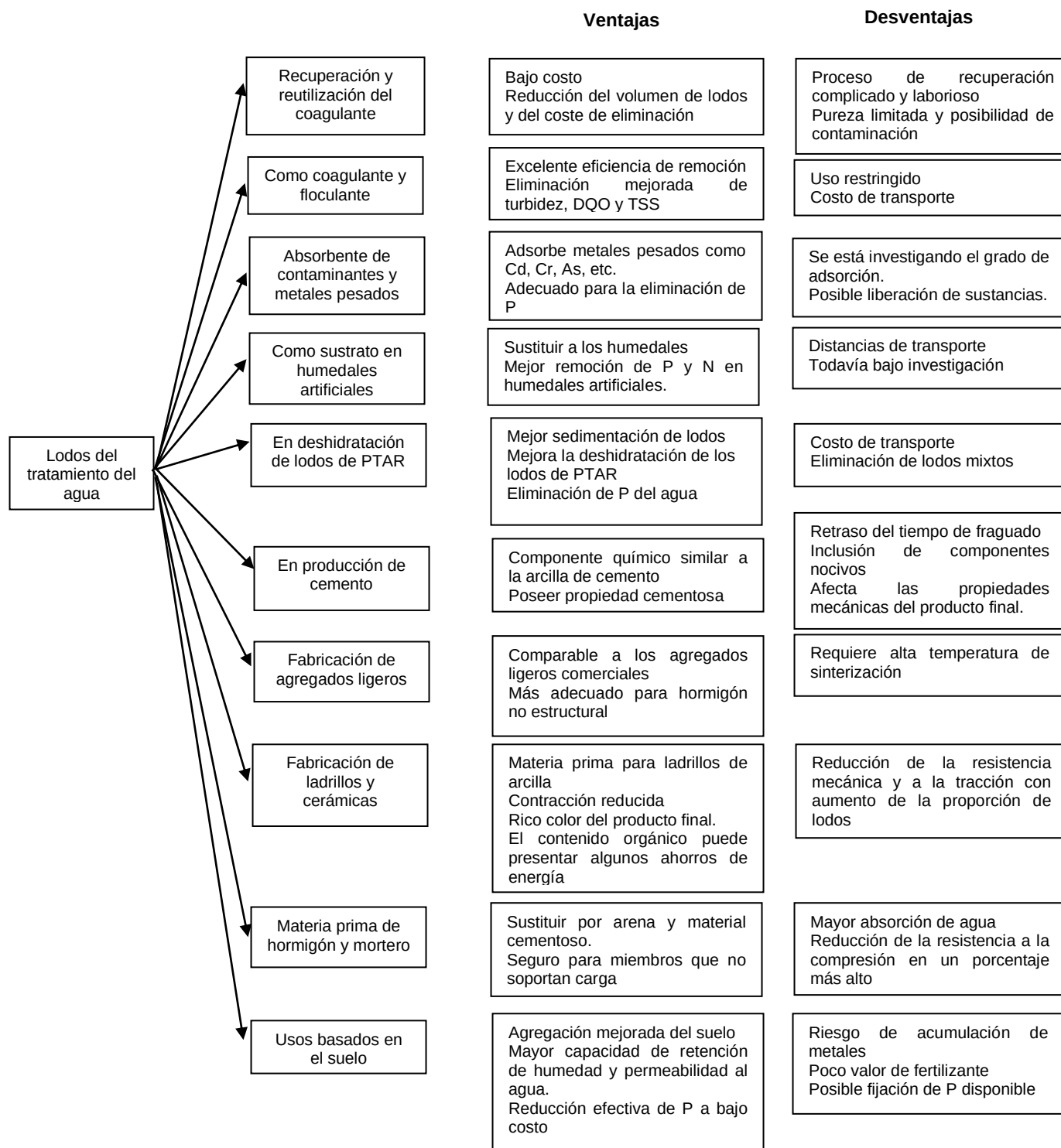
Alvarenga et al. (2018) evaluaron la efectividad de los lodos de PTAP para el mejoramiento del suelo afectado por actividades mineras. Sus resultados mostraron que la aplicación simultánea de lodos con cal corrigió la acidez del suelo y disminuyó la intratabilidad

de los metales los que permitió el crecimiento de plantas. Además de esto, tuvo un efecto positivo en la composición del extracto de agua del suelo de la mina reduciendo la toxicidad hacia los organismos acuáticos y mostrando que puede contribuir a mejorar la retención del suelo debido a la capacidad de sus óxidos de adsorber oligoelementos potencialmente tóxicos y aumentar el pH del suelo. Sin embargo, los autores recalcan que el lodo por sí mismo no es suficiente para incrementar la materia orgánica, el nitrógeno, el fósforo y el potasio del suelo a niveles óptimos por lo cual no debe ser utilizado como fertilizante. Por el contrario, el lodo podría contribuir a la deficiencia de P en la planta.

Dube et al. (2018) evaluaron los efectos del riego con diferentes diluciones de agua de lodo sobre el rendimiento y la absorción elemental de *Brachiaria decumbens* (Bachiaria) y *Medicago sativa* (Alfalfa). En la brachiaria, el aumento de la concentración de agua de lodo resultó en un aumento en el rendimiento y la absorción de macro y micronutrientes. Para la alfalfa en el suelo franco arenoso, el aumento de la concentración de agua de lodo también se obtuvo en un aumento en el rendimiento de materia seca y absorción de nutrientes. Sin embargo, en el suelo arcilloso, hubo un aumento no lineal en el rendimiento de materia seca de alfalfa y una concentración de Mn en los tejidos que puede resultar toxica. El pH del suelo aumentó con el aumento del agua de lodo mayormente en el suelo franco arenoso que en el arcilloso y los niveles de aluminio y hierro en brachiaria y alfalfa excedieron los niveles máximos tolerantes para el ganado lo que puede provocar toxicidad. Por esta razón, los autores recomiendan investigar los efectos a largo plazo de las concentraciones de agua de lodo sobre las propiedades del suelo y los efectos toxicológicos en animales de pastoreo.

Figura 11.

Ventajas y desventajas de algunos usos de los lodos de PTAP



Nota. Sustainable management of water treatment sludge through 3R concept (T. Ahmad et al., 2016b)

7.2 Alternativas de aprovechamiento de lodos generados en las plantas de tratamiento de agua residual

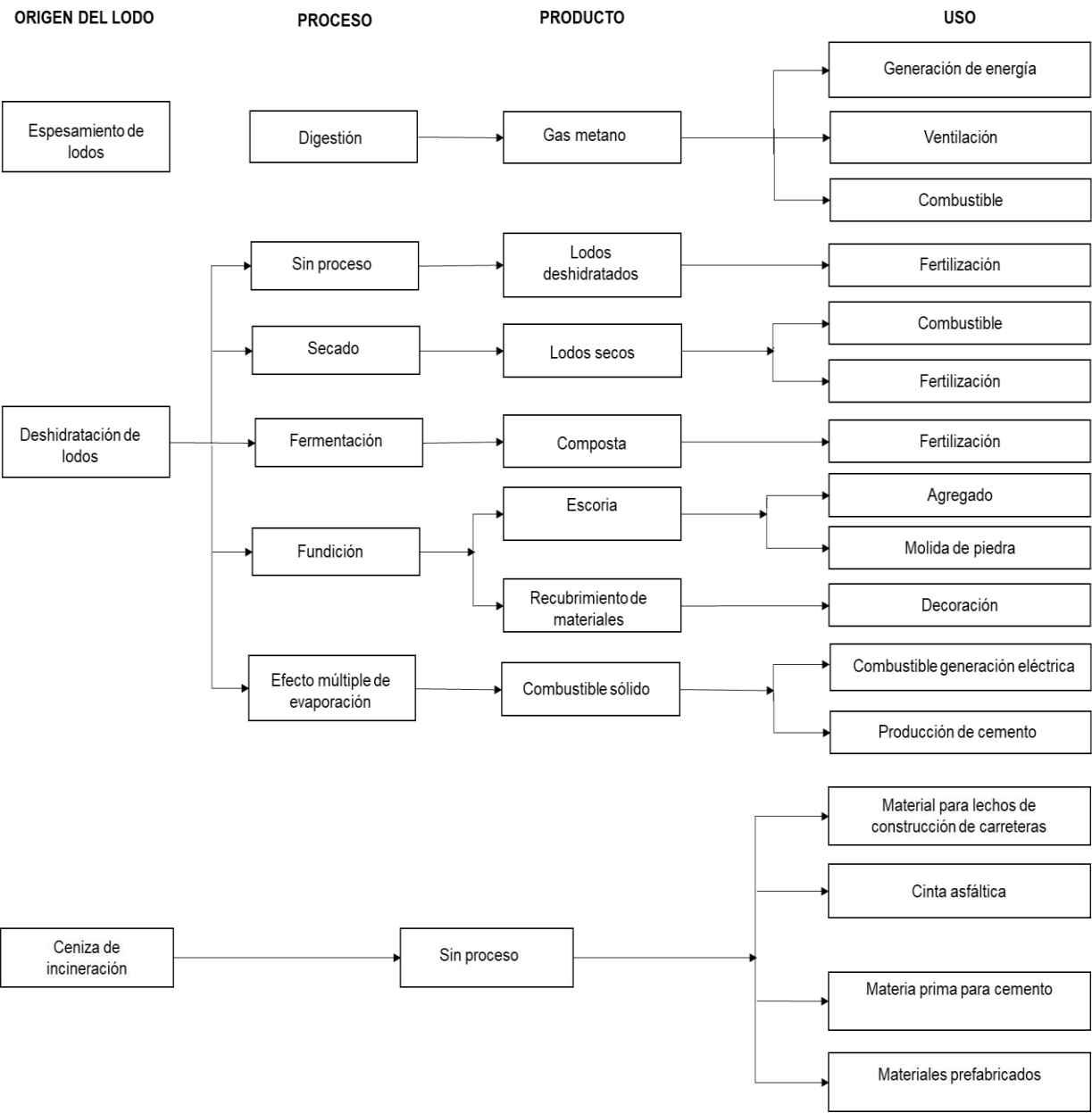
Como se dijo anteriormente, algunos métodos tradicionales como la incineración o la disposición en vertederos son utilizados para eliminar los residuos generados en el tratamiento de las aguas residuales. Sin embargo, estos métodos tienen sus deficiencias ya que pueden liberar algunos gases y contaminantes nocivos para el aire y el suelo. Por lo tanto, es necesario seguir investigando otras tecnologías de reciclaje para la eliminación de los lodos residuales (L. Wu et al., 2014).

Con la aplicación de diversas técnicas, surgen alternativas para los subproductos generados que pueden ser aplicados en diversos usos, principalmente en la construcción, la agricultura, la generación de energía e inclusive en decoración. En la figura 11 se muestra los usos que se pueden dar dependiendo del proceso utilizado y el subproducto generado (Joya Prada, 2014).

Dentro de la búsqueda bibliográfica se identificaron seis alternativas de aprovechamiento para los lodos provenientes del tratamiento de las aguas residuales, dentro de las cuales tenemos: la preparación de absorbentes carbonáceos, aprovechamiento energético, fabricación de cerámicas y materiales de construcción, aplicación en el suelo y como material de cobertura en vertederos.

Figura 12.

Usos de lodos residuales con base en su origen y los productos obtenidos de diversos procesos



Nota. Estudio del uso de los lodos generados en el tratamiento de agua potable y residual (Joya Prada, 2014)

7.2.1 Preparación de adsorbentes carbonáceos

Los materiales carbonosos porosos se conocen como poderosos adsorbentes, debido a su gran superficie y capacidad de adsorción, uno de ellos es el carbón activado. El carbón activado (CA) se utiliza ampliamente en la descontaminación del aire y de las aguas residuales debido a su capacidad de distribuir productos químicos en su gran superficie interna hidrófoba. Dado que los lodos residuales son un recurso renovable y rico en carbono pueden ser utilizados en la producción de adsorbentes carbonáceos como el carbón activado a un bajo costo (Björklund & Li, 2017; Y. Li et al., 2016; Mohammadi & Mirghaffari, 2015).

La pirólisis es un proceso necesario para la preparación de carbono, sin embargo, el rendimiento de adsorción del carbón activado preparado mediante el método tradicional de un solo paso es deficiente, por esta razón, los investigadores han separado el proceso en dos pasos: el proceso de pirólisis y el proceso de activación. Independientemente del método de pirólisis, el volumen total de los poros y el área de superficie específica del producto obtenido por carbonización directa son pequeños, por lo que es difícil usarlo como adsorbente directamente. Por lo cual, es necesaria la implementación de un proceso de activación para mejorar el índice de desempeño de este. Los métodos convencionales incluyen la activación física, la activación química y la activación físico-química (Du et al., 2019).

Durante la activación física, se pueden obtener grandes cantidades de poros en el AC, carbonizando los precursores bajo una atmósfera inerte para eliminar elementos que no son carbono, y después, activando en presencia de agentes gasificantes adecuados, como CO₂ o vapor, en un rango de temperatura de 700-1100°C. Los compuestos de carbono en el lodo

reaccionan con el agente activador en el horno de pirólisis, y el gas producido por la reacción escapa del lodo dejando poros en este (Du et al., 2019; Guan et al., 2020).

En comparación con la activación física, la activación química y la activación físico-química permiten una temperatura de preparación relativamente suave (400-700°C) en presencia de agentes químicos. Los activadores químicos generalmente se impregnan con lodo antes de la pirólisis, y luego se pirolizan. Entre los activadores químicos podemos encontrar ZnCl_2 , KOH , H_2SO_4 y otros que facilitan la pérdida de H y O. También, algunos agentes oxidantes son utilizados como activadores, como KCr_2O_4 y el reactivo de Fenton. Además, los procesos de activación química y activación físico-químico puede producir más CA, por lo cual se han convertido en los principales métodos de preparación de este (Du et al., 2019; Guan et al., 2020).

El contenido orgánico de los lodos varía según la fuente de los lodos y determina directamente la estructura de la superficie y el rendimiento de adsorción del carbón activado. Algunos estudios muestran exitosamente la preparación de adsorbentes a partir de lodos municipales concentrados. Autores como Y. Li et al. (2016), Björklund & Li (2017), y Khoshbouy et al. (2019) han conseguido adsorber diferentes tipos de contaminantes por medio de la utilización de adsorbentes preparados a partir de lodos residuales municipales.

Hay muchos tipos de compuestos orgánicos en los lodos aceitosos producidos por la industria del petróleo, lo que indica que los lodos aceitosos son un buen precursor del carbón activado (Du et al., 2019). Mohammadi & Mirghaffari (2015) obtuvieron exitosamente un adsorbente carbonáceo al convertir los lodos aceitosos producidos por la industria del petróleo a través de un proceso de activación química con KOH . Los resultados mostraron que el adsorbente carbonáceo obtenido es comparable con los carbones activados comerciales. Ding

et al., (2012) también consiguieron adsorbentes carbonáceos al convertir lodos residuales y lodos aceitosos para la remoción de antibióticos del agua. En su superficie se retuvieron cantidades significativas de antibióticos de diversas topografías y químicas. La adsorción física, la adsorción reactiva y las interacciones polares específicas se señalaron como mecanismos del proceso de separación.

Muchos tipos de carbón activado también son sintetizados por los lodos producidos durante el proceso de tratamiento del agua residual de la fabricación de cuero, la fabricación de papel y la industria textil. Los lodos residuales de la fabricación de papel contienen gran cantidad de celulosa y otros compuestos orgánicos, que son buenos precursores del carbón activado (Du et al., 2019). W.-H. Li et al., (2011) prepararon carbón activado a partir de los lodos residuales de una fábrica de papel mediante carbonización a baja temperatura seguida de activación física con vapor. El CA fue utilizado para la eliminación de azul de metileno (MB) y rojo reactivo 24 (RR 24). La capacidad máxima de adsorción del CA fue de 263.16 mg/g para el MB y 34.36 mg/g para el RR 24. Otros autores como W.-H. Li, Yue, Gao, Wang, et al. (2011), W. Li, Yue, Tu, Ma, et al., (2011) y Guan et al. (2020) también mostraron el gran potencial de la utilización de los lodos de la fabricación del papel para la preparación de CA comparando su capacidad de adsorción con la de los CA comerciales.

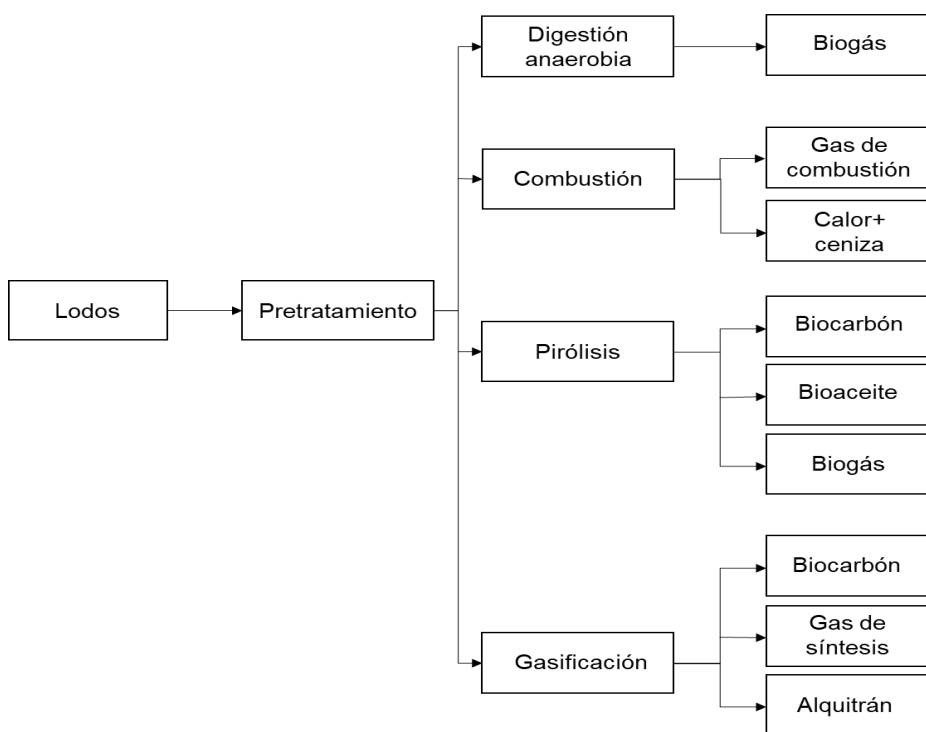
Tanto los lodos industriales como los lodos municipales muestran un gran potencial para ser utilizados como precursores de nuevos materiales adsorbentes para la eliminación de diversos contaminantes. Las aplicaciones de estos crearían una nueva clase de adsorbente económicos que ayudarían a reducir el impacto ambiental generado por la acumulación de estos residuos y conducirían a recursos hídricos más sostenibles.

7.2.2 Aprovechamiento energético

La generación de energía renovable a partir de biomasa residual ha sido explorada en numerosos estudios sobre la necesidad de promover una bioeconomía circular y también mitigar los efectos del cambio climático debido a las emisiones de gases de efecto invernadero producidas por estos residuos. La energía de los lodos residuales podría recuperarse mediante diferentes técnicas como digestión anaerobia, incineración, pirólisis y gasificación (Figura 12), las cuales dan como resultado la conversión de los lodos en gas natural, combustible líquido, químicos, calor y/o electricidad (Abdel Daiem et al., 2018; Manyuchi et al., 2018; Vatachi, 2019).

Figura 13.

Rutas potenciales de conversión de lodos a biocombustible



Nota. Wastewater sludge to energy production. A review (Vatachi, 2019)

La digestión anaerobia es un método de conversión biológica ampliamente utilizado debido a su bajo costo y la capacidad de utilizar desechos orgánicos de alta humedad sin reducir el alto poder calorífico del biogás producido, el cual es rico en metano y dióxido de carbono, y se puede utilizar para la producción de energía, calor o biocombustible. Generalmente es utilizada para el tratamiento de los lodos, donde los lodos provenientes de la sedimentación y la decantación se envían a los digestores donde procesan mediante fermentación sin oxígeno. El biogás producido puede limpiarse y mejorarse aún más para producir biometano que puede ser sustituto directo del gas natural o puede convertirse en energía térmica y eléctrica por cogeneración utilizando reactores térmicos (Mills et al., 2014; Singh et al., 2020; Vatachi, 2019). Sukson et al. (2017) mejoraron la producción de metano mediante la codigestión anaeróbica de aceite de palma con lodos residuales en estado líquido. Los resultados fueron prometedores obteniendo un rendimiento máximo de metano de 456 ml de CH₄/g.

Por otro lado, las rutas de conversión térmica, como la combustión o incineración de los lodos, se caracterizan por tiempo más cortos, que van de segundos a minutos. Estos procesos requieren lodos de baja humedad y el secado de los lodos se puede realizar con un alto consumo de energía. La descomposición rápida y controlada del 80% de la materia orgánica hace que los procesos térmicos sean más beneficiosos en comparación con la digestión anaerobia. Sin embargo, las tecnologías térmicas son altamente costosas debido las grandes cantidades de gases contaminantes que requieren de sistemas de tratamiento de gases costosos (Abdel Daiem et al., 2018; Vatachi, 2019).

A diferencia de la combustión, la pirólisis se lleva a cabo en condiciones completamente inertes (Sin oxígeno) a temperaturas moderadas a altas (300-900°C) para producir CO, H₂, CO₂,

CH₄ e hidrocarburos ligeros. La temperatura de funcionamiento, la velocidad de calentamiento y el tiempo de residencia influyen en la calidad del producto por lo cual el proceso se puede manipular para favorecer la producción de biocarbón, bioaceite o biogás. El biocombustible se puede procesar y utilizar como combustible líquido o convertir mediante síntesis en gas (Arazo et al., 2017; Vatachi, 2019). Arazo et al. (2017) investigaron la pirólisis rápida de los lodos secos para la producción de bioaceite utilizando un reactor de lecho fluidizado. Los resultados mostraron que el rendimiento de bioaceite generalmente aumenta con la temperatura y el tamaño de partícula de los lodos. También afirma que el bioaceite producido tiene un gran potencial en comparación con el bioaceite lignocelulósico derivado y sus propiedades son comparable a las del fuelóleo pesado.

Por último, la gasificación es la conversión termoquímica de los compuestos orgánicos por oxidación parcial a altas temperaturas (650-1000°C) para maximizar la producción de productos gaseosos, especialmente gas de síntesis (CO y H₂). La energía contenida en el gas producido varia de 4 a 28 MJ/Nm³ dependiendo del gas y de la temperatura. El gas puede ser utilizado para una variedad de usos finales, como la combustión directa de calor y la generación de electricidad (Vatachi, 2019).

Algunos estudios muestran el gran potencial energético en los lodos residuales, como los de Manyuchi et al. (2018) quienes afirman que los lodos son una buena materia prima para la producción de bioetanol. Sus estudios mostraron altos rendimientos de bioetanol de hasta 600 mL/L en un periodo de incubación de 10 días, con una temperatura de operación de 30°C y pH de 6.5 con levadura de 6% en peso como catalizador de fermentación. Los análisis mostraron que el bioetanol obtenido es comparable al biocombustible estándar. Por otro lado, Abdel Daiem

et al. (2018) usaron la codigestion de la paja de arroz con los lodos residuales para la producción de biogás. El análisis del biogás obtenido mostro que el metano era el componente más alto (60-63%) seguido del dióxido de carbono, lo cual representa una fuente atractiva de energía renovable. También los estudios de X. Wu et al. (2016) mostraron que la producción de biodiesel a partir de lodos residuales es factible mediante el uso de transesterificación con catalizadores alcalinos con un rendimiento correspondiente de biodiesel del 6.8%.

Vieira et al. (2017) afirman que la producción de biocombustibles a partir de lodos presenta un gran potencial y que puede ayudar a la generación de energía reduciendo los costos operativos y los impactos ambientales generados. Sin embargo, es necesario realizar más investigaciones con el fin de promover el desarrollo de tecnología piloto e industrial, y la introducción y comercialización del producto final en el mercado a medio y largo plazo.

7.2.3 *Fabricación de cerámicas*

Algunos estudios han abordado el uso de las cenizas de lodos residuales incineradas como sustituto de la arcilla en la fabricación de productos cerámicos. Las cenizas de los lodos residuales se presentan en forma de polvo fino, por lo que se pueden mezclar directamente con otros componentes de la pasta cerámica (Smol et al., 2015). Montero et al. (2009) estudiaron los efectos sobre las propiedades de un material cerámico (contracción lineal, absorción de agua, resistencia a la flexión) cuando se sustituye la arcilla por lodos residuales y residuos de mármol en distintas proporciones. Dentro de sus resultados encontraron que no parece existir una relación clara entre los valores de contracción lineal del producto y el contenido de residuo. Sin embargo, observaron un aumento de la absorción de agua cuando se aumenta el contenido de

residuo. También disminuyó la resistencia a la flexión. Rozenstrauha et al. (2011) investigaron la posibilidad de producir materiales cerámicos a partir de lodos residuales y residuos de vidrio utilizando el método de tecnología del polvo. De más de 20 mezclas se escogieron dos como las más óptimas: material N2 (20% en peso de residuos de vidrio y 30% en peso de lodos residuales y 50% en peso de arcilla) y material N5 (20% en peso de residuos de vidrio, 20% en peso de lodos residuales y 60% en peso de arcilla). Las mejores propiedades físico-mecánicas obtenidas se dieron para el material N5 con densidad aparente 2.19 g/cm³, absorción de agua 2.5%, porosidad 5% y resistencia a la compresión 60.31 ± 5.09 MPa. Amin et al. (2018) añadieron un porcentaje de lodo residual del 5% hasta el 35% a una mezcla estándar de baldosas, la moldearon y prensaron a 30 MPa y luego la quemaron a temperaturas que alcanzaron los 1150°C durante 15 minutos. Los resultados mostraron que las baldosas cumplían con las normas ISO para la adición máxima de 7% de lodo cocido a 1150°C (para absorción de agua <10%) y 10% de lodo o 5% de lodo para baldosas cocidas a 1150°C y 1100°C, respectivamente (para absorción de agua >10%).

A pesar de que las cenizas de lodo se pueden incorporar directamente a las pastas cerámicas casi sin tratamiento inicial, está el hecho de que estas contienen altas cantidades de óxidos de hierro y metales, lo que puede afectar negativamente las propiedades del producto final. Sin embargo, este problema podría resolverse mediante la elección juiciosa de la cantidad de ceniza de lodo agregada (Smol et al., 2015).

7.2.4 Fabricación de materiales de construcción

Para la aplicación de lodos residuales en materiales de construcción, la composición mineral y propiedad geotécnica se convierte en un punto clave en numerosos estudios. Los

principales componentes óxidos de los lodos residuales son SiO_2 , CaO , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO y P_2O_5 , aunque su composición y calidad pueden variar significativamente según la fuente de las aguas residuales y los tipos y dosis de aditivos introducidos en el proceso de tratamiento de lodos. En comparación con los lodos residuales, sus cenizas tienen un mayor contenido de SiO_2 , CaO y Al_2O_3 que son comparables a los materiales hidráulicos latentes, materiales puzolánicos y materiales de relleno. Además de esto, se puede observar un alto contenido de Fe_2O_3 en los lodos residuales, lo que los hace favorables para la producción de cemento y ladrillos (Chang et al., 2020).

La cal (CaO) es ampliamente utilizada en el tratamiento de los lodos residuales los que da como resultado un alto contenido de CaO en los lodos por lo cual estos podrían utilizarse como una materia prima alternativa en la fabricación de clinker, aportando calcio en el crudo en sustitución de la piedra caliza. Sin embargo, el alto contenido de materia orgánica puede afectar las propiedades del cemento y producir una alta porosidad por lo que se recomienda un pretratamiento previo antes de usarlos (Chang et al., 2020; Orellana León, 2015).

Orellana León (2015) utilizó lodos de diferentes PTAR para la fabricación de ladrillos y sus resultados mostraron que los ladrillos con adiciones de hasta un 20% de lodos no presentan diferencias importantes en su resistencia a la compresión con relación a los ladrillos sin adiciones. Además, los ladrillos con adiciones del 10% de lodos residuales presentaron mayores resistencias que los ladrillos sin adiciones. El autor afirma que esto puede ser debido al llenado de espacios vacíos intersticiales en la mezcla total por la parte mineral inorgánica de los lodos residuales. Por otra parte, Piasta & Lukawska, (2016) evaluaron el efecto de las cenizas de lodos residuales en las propiedades de las pastas frescas y los morteros endurecidos en comparación

con el cemento Portland. Dentro de sus resultados encontraron que los tiempos de fraguado se prolongan con la adición de cenizas de lodos en comparación con el cemento Portland, esto puede atribuirse a la presencia de compuestos de fósforo en las cenizas. La ganancia de resistencia en morteros que contienen 10% y 20% de cenizas de lodos fue más lenta que la de los morteros con cemento Portland. Sin embargo, la adición de 10% de cenizas de lodo puede utilizarse como una adición segura para la obtención de un buen material. Además de esto, el contenido de cada uno de los metales en las cenizas de lodo fue inferior a 0.1% por lo cual lo convierte en un complemento adecuado para morteros y hormigones.

Similares resultados fueron obtenidos por Chang et al. (2020), quienes afirman que los lodos residuales podrían utilizarse de forma segura hasta en un 15% en la producción de un cemento que posea componentes minerales similares y un rendimiento comparable al del cemento Portland. Los autores afirman que la adición excesiva provoca una disminución de la resistencia a la compresión, un aumento de la demanda de agua y del tiempo de fraguado de la pasta de cemento. Rabie et al. (2019) investigó la utilización de lodos secos y húmedos provenientes de aguas residuales. Sus resultados también mostraron que las adiciones al 15% pueden ser utilizadas como aditivo para la mezcla de concreto sin causar una reducción marcada en la resistencia a la compresión. Sin embargo, los resultados indican que se puede agregar un 5% de lodo seco con un cambio no notable en la resistencia del concreto. Esto indica que el efecto al agregar lodos secos es menor que el efecto de los lodos húmedos, esto debido a la eliminación de la materia orgánica.

7.2.5 Aplicación en el suelo

Una estrategia para minimizar la degradación de los suelos agrícolas es la incorporación de materia orgánica; y como se ha dicho anteriormente, los lodos residuales constituyen una gran fuente de materia orgánica, por lo tanto, tienen potencial para uso en los suelos. La aplicación de lodos residuales en el suelo se ha convertido en uno de los métodos de eliminación más prometedores ya que, estudios anteriores han mostrado que la aplicación de lodos provee numerosos beneficios como acondicionador físico del suelo mejorando la porosidad, la infiltración y aumentando la resistencia a la erosión, como aporte de micro y macro nutrientes y de materia orgánica, y contribuyendo a mejorar sus propiedades químicas (pH, capacidad de intercambio catiónico, densidad aparente, etc.) y biológicas (incremento de la actividad microbiana). (Carlos et al., 2013; Rrong et al., 2016).

La aplicación de lodos residuales puede mejorar significativamente el pH del suelo y aumentar su fertilidad. El efecto es mejor que el de los fertilizantes químicos, con igual cantidad de nutrientes por lo que es a una alternativa más ecológica. Además de esto, la utilización de lodos mejora la calidad del suelo, recicla los nutrientes en el sistema del suelo y por lo tanto reduce o elimina la necesidad de fertilizantes inorgánicos. Sin embargo, una de las principales preocupaciones que limita su utilización a largo plazo es la disponibilidad y movilidad de macronutrientes y las trazas de metales pesados. El método con el que se procesa los lodos puede cambiar significativamente su concentración de oligoelementos y la disponibilidad de sus micro y macro nutrientes, lo cual podría reducir el rendimiento de los cultivos y conducir a una acumulación de nutrientes en exceso en el suelo (De Andrés et al., 2010; Elmi et al., 2020; Rrong et al., 2016).

Hei et al. (2016) afirman que la aplicación de lodos residuales a terrenos agrícolas exige validar la cantidad máxima de metales pesados, monitoreando sus efectos en el suelo y en las plantas. Por esta razón, en su investigación agregaron estabilizadores de metales pesados a los lodos que estuvieron contenidos en recipientes plásticos usados y a través de lluvia natural o artificial se permitió que los componentes del fertilizante fluyeran hacia el suelo mientras que los metales pesados se fijaron dentro del contenedor. Los experimentos en macetas con plantas mostraron efectos positivos sobre la producción vegetal y la reducción de metales pesados en las plantas. Los autores concluyen que los contenedores de plástico hacen que los lodos de aguas residuales sean útiles como recurso fertilizante orgánico y disminuyen la contaminación de los suelos y plantas por los metales pesados. Por otra parte, Dad et al. (2019) investigaron la efectividad de siete biosólidos en diferentes parámetros de crecimiento del cultivo de trigo. Los resultados mostraron que los diferentes tipos de biosólidos diferían en el contenido de nitrógeno y fósforo con los contenidos más altos en los biosólidos deshidratados (5.70% de nitrógeno, 2.32% de fósforo) y biosólidos líquidos (2.35% de fósforo). La altura y el diámetro de la planta al igual que el rendimiento en peso seco de trigo se incrementaron con el aumento de las concentraciones de biosólidos. Los autores concluyeron que todos los biosólidos tienen un valor fertilizante y pueden reemplazar los fertilizantes sintéticos de uso agrícola. Sin embargo, advierten que deben realizarse extensos estudios para evitar la toxicidad de los metales pesados que se acumulan en el suelo.

Cristina et al. (2020) llevaron a cabo experimentos en macetas bajo condiciones de invernadero para evaluar los efectos fertilizantes de cuatro lodos digeridos anaeróbicamente durante un periodo de tres meses. Las plantas tratadas con el lodo digerido mostraron valores de

biomasa y altura de hasta 12.7 y 2.5 pliegues, respectivamente, superiores al tratamiento mineral, lo que indica que los lodos digeridos podrían ser una alternativa valiosa a los fertilizantes minerales. Además de esto, los autores resaltan los incrementos de algunos macronutrientes (nitrógeno, fósforo y calcio) y micronutrientes (hierro y zinc) en suelos arenosos con respecto al control no tratado. Antonkiewicz et al. (2020) estudiaron el efecto del carbón bituminoso, la cenizas de biomasa y los lodos residuales sobre la cantidad y calidad de una mezcla de gramíneas y leguminosas durante un periodo de 6 años. Los resultados mostraron que la aplicación conjunta de carbón bituminoso o ceniza de biomasa con lodos residuales dio como resultado la relación de Ca: Mg óptima para el forraje. La tasa de recuperación de los macroelementos disminuyó en el siguiente orden: K, N, P, Mg, Na y Ca. Estos resultados respaldan que la aplicación de desechos sólidos como cenizas y lodos residuales ayudan a mejorar la productividad, el reciclaje de macronutrientes y reducir la dependencia de fertilizantes minerales.

7.2.6 Material de cobertura en vertederos

En un relleno sanitario se suele necesitar una gran cantidad de material de cobertura para cubrir la basura. Los lodos se pueden utilizar como alternativa a los materiales de cobertura tradicionales pero debido a su alto contenido de agua y baja resistencia, es necesario modificarlos para mejorar sus propiedades mecánicas (He et al., 2015).

He et al. (2015) realizaron pruebas de resistencia y conductividad hidráulica para estudiar la viabilidad de utilizar los lodos residuales modificados como material de cobertura de relleno sanitario. Sus resultados mostraron que los requisitos de resistencia y permeabilidad, cuando se utilizan como cobertura provisional, se pueden cumplir con una relación en peso de lodo: cal:

cemento: limo: agregado derivado de neumáticos de 100: 15: 5: 70: 15. Los resultados también mostraron que la proporción de contenido de sólidos de los lodos residuales modificados debería ser superior al 60% cuando se utilizan como material de cobertura temporal y es crucial tanto para la resistencia como para el rendimiento hidráulico. Además de esto, encontraron que a medida que aumenta la duración del remojo de los lodos modificados en lixiviados, aumenta la resistencia a la compresión no confinada y la conductividad hidráulica disminuye ligeramente o fluctúa entre 1.0×10^{-5} cm/s y 1.0×10^{-6} cm/s, pero sigue cumpliendo los requisitos para una cobertura provisional.

Rosli et al. (2020) propuso el reciclaje de lodos residuales y yeso rojo como materiales de cobertura temporal para rellenos sanitarios. Los autores prepararon y probaron mezclas con diferentes composiciones de lodos residuales y yeso rojo para determinar la mezcla de diseño más adecuada en función de las propiedades físicas, mecánicas y geotécnicas resultantes. En los resultados lograron una resistencia máxima a la compresión de 524 kPa para la composición óptima de lodo: yeso rojo de 1:1, mayor que el mínimo especificado de 345 kPa, lo que demuestra que es apropiada para su aplicación como material alternativo para la cobertura temporal de rellenos sanitarios.

8. Conclusiones

La falta de sistemas de tratamiento de aguas en Colombia ha conducido a que los lodos sean dispuestos de manera inadecuada en sistemas de alcantarillado, cuerpos de agua o en tiraderos a cielo abierto sin ningún tratamiento previo generando impactos ambientales

negativos. Debido a que la generación de lodos es inevitable, es de vital importancia realizar un tratamiento y disposición final adecuados para ellos. Además, es necesario un mayor estudio y una normatividad más exigente sobre el manejo y disposición de estos para evitar impactos en el medio ambiente y la salud humana.

Para poder realizar un manejo, tratamiento, control y disposición de lodos residuales, es importante conocer el proceso de formación del lodo, las diferentes etapas en que estos se producen, permitiendo así una correcta gestión del residuo.

Los lodos producidos en los procesos de potabilización y tratamiento de agua residual industrial se encuentran formados principalmente por sustancias orgánicas, inorgánicas y biológicas, que de no recibir el tratamiento adecuado para su disposición pueden ocasionar daños y afectaciones a la salud y el ambiente.

Los lodos provenientes del tratamiento de agua potable y residual varían dependiendo de su origen, contaminantes, tiempos de retención, contenido de humedad, frecuencia con que se remueven los lodos, y las características fisicoquímicas y biológicas de este, es por esto, que su caracterización es de gran relevancia al momento de darle un uso y aprovechamiento a estos lodos o en caso de que no se puedan utilizar darle la disposición final adecuada.

Al realizar una comparación entre los lodos de PTAP y PTAR, se encontraron diferencias significativas en las características y composición de cada uno de ellos. Los lodos de PTAP por

tener una alta carga de coagulante, poseen altas concentraciones de sílice, alúmina, óxidos de hierro y cal dentro de sus componentes químicos, además de componentes inertes como la arcilla y arena. Los lodos de PTAR, a diferencia de los de PTAP, poseen una cantidad considerable de microorganismos, materia orgánica, metales pesados y otros contaminantes (dependiendo de las aguas residuales de donde provengan) que los hacen aptos para otros tipos de usos, pero que requieren de un mayor cuidado para su aplicación.

La legislación y el marco normativo vigente en Colombia han permitido que se establezcan políticas y estrategias referentes al manejo, tratamiento, uso, aprovechamiento y la disposición de los lodos residuales de agua potable y agua residual. Sin embargo, es importante realizar más estudios sobre los posibles impactos generados por estos residuos y establecer una mayor vigilancia sobre el manejo y disposición final de ellos.

Aunque los métodos de manejo y disposición final de los lodos son suficientes por el momento, el incremento de la población y con ello, el aumento del agua potable requerida y las aguas residuales generadas, han conducido a una mayor producción de estos. Debido a esto y al deterioro constante del medio ambiente se hace cada vez más necesario la búsqueda de nuevas tecnologías para hacer de este residuo un subproducto aprovechable y rentable.

La caracterización adecuada y el contraste de los diferentes lodos es un requisito crítico para encontrar la alternativa de la reutilización eficaz de estos. Debido a que se deben cumplir

características específicas en cuanto a los requerimientos y condiciones operativas para cada una de las alternativas anteriormente expuestas.

En la búsqueda bibliográfica fueron encontrados 9 alternativas de uso para los lodos provenientes del tratamiento del agua potable y 6 alternativas de uso para los lodos provenientes del tratamiento del agua residual. Esto indica que existe una mayor preocupación en el uso de los lodos provenientes de PTAR por el alto contenido de patógenos, metales pesados y materia orgánica que interfieren en las alternativas de uso para estos lodos. En cuanto a los lodos provenientes de PTAP se consideran relativamente limpios con respecto a metales pesados y compuestos orgánicos, por lo tanto, representan un riesgo ambiental inferior.

Los lodos de PTAP tienen un gran potencial para ser reutilizados en los procesos de tratamiento de aguas residuales, ya que debido a su composición presentan características adsorbentes que permiten la eliminación de contaminantes y metales pesados presentes en estas aguas. En cuanto, a los lodos de PTAR se observó que pueden ser utilizados para la preparación de adsorbentes carbonáceos, ampliamente utilizados en la descontaminación del aire y las aguas residuales.

En los últimos años, el campo de la construcción ha tenido un desarrollo acelerado, y por lo tanto se ha generado un incremento en la demanda de recursos para su producción, es por esto, que el uso de lodos residuales de PTAP y PTAR ha tenido gran impulso en la fabricación de ladrillos, productos cerámicos y materiales de construcción. Los lodos muestran una gran

aplicabilidad en este sector, siendo una fuente de producción constante y confiable, ya que cumplen con las características necesarias para generar materiales de buena calidad.

Los lodos de PTAR muestran un gran poder calorífico lo que indica que pueden ser utilizados para la generación de biocombustibles y energía. Con su aprovechamiento térmico se podrían obtener dos ventajas: la primera, la eliminación del residuo de manera sostenible y la segunda, se podría reducir la extracción de materiales fósiles no renovables. Además de esto, se encontró que los lodos de PTAP podrían ser reutilizados para el mejoramiento de la producción de biogás, sin embargo, debido a lo reciente del estudio, debe ser más ampliamente estudiado.

El uso de lodos de PTAR ha tenido gran acogida en el ambiente agrícola y forestal, sin embargo, el uso de estos debe estar sujeto a estudios, ya que contienen gran cantidad de contaminantes y metales pesados, además de que podrían ocasionar la transferencia de patógenos en la cadena alimentaria provocando daños a la salud y al ambiente. En cuanto a la aplicación de lodos de PTAP en el suelo, también es una opción ventajosa económicamente, debido que presentan características que puede mejorar las propiedades de los suelos en mal estado. Sin embargo, se debe ser cuidadoso con su aplicación ya que podrían contribuir a la deficiencia de fósforo en las plantas.

A partir de la revisión bibliográfica de esta monografía, se concluye que existe un potencial de aprovechamiento en los lodos de PTAP y PTAR industrial y se insiste en la realización de proyectos que generen alternativas viables y sostenibles para su reutilización,

donde no sean destinados como desecho, ocasionando gastos operativos y operacionales para su manejo y disposición final y generando posibles impactos ambientales y/o en la salud humana.

Referencias Bibliográficas

- Abdel Daiem, M. M., Said, N., & Negm, A. M. (2018). Potential energy from residual biomass of rice straw and sewage sludge in Egypt. *Procedia Manufacturing*, 22, 818-825.
<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.03.116>
- Abo-El-Enein, S. A., Shebl, A., & Abo El-Dahab, S. A. (2017). Drinking water treatment sludge as an efficient adsorbent for heavy metals removal. *Applied Clay Science*, 146, 343-349.
<https://doi.org/10.1016/j.clay.2017.06.027>
- Ahmad, T., Ahmad, K., & Alam, M. (2016a). Characterization of Water Treatment Plant's Sludge and its Safe Disposal Options. *Procedia Environmental Sciences*, 35, 950-955.
<https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.07.088>
- Ahmad, T., Ahmad, K., & Alam, M. (2016b). Sustainable management of water treatment sludge through 3'R' concept. *Journal of Cleaner Production*, 124, 1-13.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.02.073>
- Ahmad, Tarique, Ahmad, K., Ahad, A., & Alam, M. (2016). Characterization of water treatment sludge and its reuse as coagulant. *Journal of Environmental Management*, 182, 606-611.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.08.010>
- Alvarenga, P., Ferreira, C., Mourinha, C., Palma, P., & de Varennes, A. (2018). Chemical and ecotoxicological effects of the use of drinking-water treatment residuals for the remediation of soils degraded by mining activities. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 161, 281-289. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.05.094>

- Amador-Díaz, A., Veliz-Lorenzo, E., & Bataller-Venta, M. (2015). Tratamiento de lodos, generalidades y aplicaciones. 46, 11.
- Amin, Sh. K., Abdel Hamid, E. M., El-Sherbiny, S. A., Sibak, H. A., & Abadir, M. F. (2018). The use of sewage sludge in the production of ceramic floor tiles. *HBRC Journal*, 14(3), 309-315. <https://doi.org/10.1016/j.hbrcj.2017.02.002>
- Antonkiewicz, J., Popławska, A., Kołodziej, B., Ciarkowska, K., Gambuś, F., Bryk, M., & Babula, J. (2020). Application of ash and municipal sewage sludge as macronutrient sources in sustainable plant biomass production. *Journal of Environmental Management*, 264. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110450>
- Arazo, R. O., Genuino, D. A. D., de Luna, M. D. G., & Capareda, S. C. (2017). Bio-oil production from dry sewage sludge by fast pyrolysis in an electrically-heated fluidized bed reactor. *Sustainable Environment Research*, 27(1), 7-14. <https://doi.org/10.1016/j.serj.2016.11.010>
- Babatunde, A. O., & Zhao, Y. Q. (2010). Equilibrium and kinetic analysis of phosphorus adsorption from aqueous solution using waste alum sludge. *Journal of Hazardous Materials*, 184(1-3), 746-752. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.08.102>
- Bai, L., Wang, C., Huang, C., He, L., & Pei, Y. (2014). Reuse of drinking water treatment residuals as a substrate in constructed wetlands for sewage tertiary treatment. *Ecological Engineering*, 70, 295-303. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.06.015>
- Bal Krishna, K. C., Aryal, A., & Jansen, T. (2016). Comparative study of ground water treatment plants sludges to remove phosphorous from wastewater. *Journal of Environmental Management*, 180, 17-23. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.05.006>

- Benlalla, A., El moussaouiti, M., Dahhou, M., & Assafi, M. (2015). Utilization of water treatment plant sludge in structural ceramics bricks. *Applied Clay Science*, 118, 171-177.
<https://doi.org/10.1016/j.clay.2015.09.012>
- Björklund, K., & Li, L. Y. (2017). Adsorption of organic stormwater pollutants onto activated carbon from sewage sludge. *Journal of Environmental Management*, 197, 490-497.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.04.011>
- Bohórquez González, K., Pacheco, E., Guzmán, A., Avila Pereira, Y., Cano Cuadro, H., & Valencia, J. A. F. (2020). Use of sludge ash from drinking water treatment plant in hydraulic mortars. *Materials Today Communications*, 23.
<https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.100930>
- Caniani, D., Masi, S., Mancini, I. M., & Trulli, E. (2013). Innovative reuse of drinking water sludge in geo-environmental applications. *Waste Management*, 33(6), 1461-1468.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.02.007>
- Carlos, G. J., Carolina, L., Felipe, S., & Ana, A. (2013). Uso potencial de los lodos urbanos en la producción agrícola. 17, 10.
- Carreño, L. N. R. (2019). Aprovechamiento de los lodos de planta de tratamiento de aguas residuales en empresa láctea, municipio de Cogua. Fundación Universidad de América.
- Castillo, I. J. M. (2013). Plan de gestión para lodos generados en las PTAR-D de los municipios de Cumaral y San Martín de los Llanos en el departamento del Meta. Pontificia Universidad Javeriana.
- Cerón, O., Millán, S., Espejel, F., & Ramírez, R. M. (2007). Aplicación de lodos de plantas potabilizadoras para elaborar materiales de construcción. 11.

- Chang, Z., Long, G., Zhou, J. L., & Ma, C. (2020). Valorization of sewage sludge in the fabrication of construction and building materials: A review. *Resources, Conservation and Recycling*, 154. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104606>
- Cheng, W.-P., Chen, P.-H., Yu, R.-F., & Ho, W.-N. (2016). Treating ammonium-rich wastewater with sludge from water treatment plant to produce ammonium alum. *Sustainable Environment Research*, 26(2), 63-69. <https://doi.org/10.1016/j.serj.2015.11.002>
- Chulluncuy-Camacho, N. C. (2011). Tratamiento de agua para consumo humano. *Ingeniería Industrial*, 0(029), 153. <https://doi.org/10.26439/ing.ind2011.n029.232>
- Córdova, M. V. M. (2012). Estudio para el tratamiento, manejo y disposición final de lodos generados en plantas de tratamiento de agua potable. Escuela Politecnica Nacional.
- Cremades, L. V., Cusidó, J. A., & Arteaga, F. (2018). Recycling of sludge from drinking water treatment as ceramic material for the manufacture of tiles. *Journal of Cleaner Production*, 201, 1071-1080. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.094>
- Cristina, G., Camelin, E., Tommasi, T., Fino, D., & Pugliese, M. (2020). Anaerobic digestates from sewage sludge used as fertilizer on a poor alkaline sandy soil and on a peat substrate: Effects on tomato plants growth and on soil properties. *Journal of Environmental Management*, 269. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110767>
- Dad, K., Wahid, A., Khan, A. A., Anwar, A., Ali, M., Sarwar, N., Ali, S., Ahmad, A., Ahmad, M., Khan, K. A., Ansari, M. J., Gulshan, A. B., & Mohammed, A. A. (2019). Nutritional status of different biosolids and their impact on various growth parameters of wheat (*Triticum aestivum* L.). *Saudi Journal of Biological Sciences*, 26(7), 1423-1428. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2018.09.001>

- Dassanayake, K. B., Jayasinghe, G. Y., Surapaneni, A., & Hetherington, C. (2015). A review on alum sludge reuse with special reference to agricultural applications and future challenges. *Waste Management*, 38, 321-335. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.11.025>
- Daza Márquez, N., & Medina Sanchez, A. (2018). Análisis comparativo del contenido de óxidos presentes en las cenizas de lodos de PTAP y el cemento Portland tipo Uno. Universidad de la Costa.
- De Andrés, E. F., Tenorio, J. L., & Walter, I. (2010). Biomass production and nutrient concentration of kenaf grown on sewage sludge-amended soil. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 8(2), 472. <https://doi.org/10.5424/sjar/2010082-1202>
- Decreto 1287 de 2014. Julio 10 de 2014. Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. República de Colombia.
- Decreto 1594 de 1984. Junio 26 de 1984. Usos del agua y residuos líquidos. República de Colombia
- Decreto 2811 de 1974. Diciembre 18 de 1974. Diario Oficial No. 34.243 del 27 de enero de 1975. República de Colombia.
- Decreto 4741 de 2005. Diciembre 30 de 2005. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Diario Oficial No. 46.137. República de Colombia
- Devi, P., & Saroha, A. K. (2017). Utilization of sludge based adsorbents for the removal of various pollutants: A review. *Science of The Total Environment*, 578, 16-33. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.10.220>

Díaz Ibarra, M. A., Muy Rangel, M. D., Rubio Carrasco, W., & Armendáriz Alcaraz, O. (2010).

Aplicación de lodos de procesos de potabilización como mitigantes de la sodicidad en suelos agrícolas. 12.

Ding, R., Zhang, P., Seredych, M., & Bandosz, T. J. (2012). Removal of antibiotics from water using sewage sludge- and waste oil sludge-derived adsorbents. *Water Research*, 46(13), 4081-4090. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.05.013>

Du, M., Yu, T., Wang, F., & Qu, C. (2019). Study on preparation of activated carbon from sludge. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 484. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/484/1/011001>

Dube, S., Muchaonyerwa, P., Mapanda, F., & Hughes, J. (2018). Effects of sludge water from a water treatment works on soil properties and the yield and elemental uptake of *Brachiaria decumbens* and lucerne (*Medicago sativa*). *Agricultural Water Management*, 208, 335-343. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.06.015>

Ebrahimi-Nik, M., Heidari, A., Ramezani Azghandi, S., Asadi Mohammadi, F., & Younesi, H. (2018). Drinking water treatment sludge as an effective additive for biogas production from food waste; kinetic evaluation and biomethane potential test. *Bioresource Technology*, 260, 421-426. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.03.112>

El-Didamony, H., Khalil, Kh. A., & Heikal, M. (2014). Physico-chemical and surface characteristics of some granulated slag-fired drinking water sludge composite cement pastes. *HBRC Journal*, 10(1), 73-81. <https://doi.org/10.1016/j.hbrcj.2013.09.004>

- Elmi, A., Al-Khaldy, A., & AlOlayan, M. (2020). Sewage sludge land application: Balancing act between agronomic benefits and environmental concerns. *Journal of Cleaner Production*, 250. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119512>
- Estrada Brito, P. M. (2015). Diseño de un plan manejo de lodos residuales generados por una planta de potabilización de agua. Universidad Tecnológica Equinoccial.
- Fernando, B. R. A. (2014). Valoración de lodos sedimentados generados en las lagunas de estabilización de EPSEL para uso como abono orgánico. Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo.
- Gao, J., Zhao, J., Zhang, J., Li, Q., Gao, J., Cai, M., & Zhang, J. (2020). Preparation of a new low-cost substrate prepared from drinking water treatment sludge (DWTs)/bentonite/zeolite/fly ash for rapid phosphorus removal in constructed wetlands. *Journal of Cleaner Production*, 261, 121110. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121110>
- Garcés Arancibia, F., Díaz Aguirre, J. C., & Dellepiane Navarro, O. M. (2004). Acondicionamiento de lodos producidos en el tratamiento de agua potable. 8.
- García, N. O. (2006). Lodos residuales: Estabilización y manejo. *Caos Conciencia* 1: 51-58. Departamento de Ingeniería. Universidad de Quintana Roo. México.
- Gibbons, M. K., & Gagnon, G. A. (2011). Understanding removal of phosphate or arsenate onto water treatment residual solids. *Journal of Hazardous Materials*, 186(2-3), 1916-1923. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.12.085>
- Godoy, L. G. G. de, Rohden, A. B., Garcez, M. R., Costa, E. B. da, Da Dalt, S., & Andrade, J. J. de O. (2019). Valorization of water treatment sludge waste by application as

- supplementary cementitious material. *Construction and Building Materials*, 223, 939-950.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.333>
- Guan, Q., Gao, K., Ning, P., Miao, R., & He, L. (2020). Value-added utilization of paper sludge: Preparing activated carbon for efficient adsorption of Cr(VI) and further hydrogenation of furfural. *Science of The Total Environment*, 741, 140265.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140265>
- Gutiérrez-Rosero, J. A., Ramírez-Fajardo, Á. I., Rivas, R., Linares, B., & Paredes, D. (2014). Tratamiento de lodos generados en el proceso convencional de potabilización de agua. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 13(25), 13-27.
<https://doi.org/10.22395/rium.v13n25a1>
- Hammeken Arana, A. M., & Romero García, E. (2005). Análisis y diseño de una planta de tratamiento de agua residual para el municipio de San Andres Cholula. *Universidad de las Américas*.
- He, J., Li, F., Li, Y., & Cui, X. (2015). Modified sewage sludge as temporary landfill cover material. *Water Science and Engineering*, 8(3), 257-262.
<https://doi.org/10.1016/j.wse.2015.03.003>
- Hei, L., Jin, P., Zhu, X., Ye, W., & Yang, Y. (2016). Characteristics of Speciation of Heavy Metals in Municipal Sewage Sludge of Guangzhou as Fertilizer. *Procedia Environmental Sciences*, 31, 232-240. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.02.031>
- Heniegal, A. M., Ramadan, M. A., Naguib, A., & Agwa, I. S. (2020). Study on properties of clay brick incorporating sludge of water treatment plant and agriculture waste. *Case Studies in Construction Materials*, 13, e00397. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00397>

- Hou, Q., Meng, P., Pei, H., Hu, W., & Chen, Y. (2018). Phosphorus adsorption characteristics of alum sludge: Adsorption capacity and the forms of phosphorus retained in alum sludge. *Materials Letters*, 229, 31-35. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2018.06.102>
- Jangkorn, S., Kuhakaew, S., Theantanoo, S., Klinla-or, H., & Sriwiriyarat, T. (2011). Evaluation of reusing alum sludge for the coagulation of industrial wastewater containing mixed anionic surfactants. *Journal of Environmental Sciences*, 23(4), 587-594. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(10\)60451-2](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(10)60451-2)
- Joya Prada, A. (2014). Estudio del uso de los lodos generados en el tratamiento de agua potable y residual. Universidad Industrial de Santander.
- Keeley, J., Jarvis, P., & Judd, S. J. (2012). An economic assessment of coagulant recovery from water treatment residuals. *Desalination*, 287, 132-137. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.09.013>
- Khoshbouy, R., Takahashi, F., & Yoshikawa, K. (2019). Preparation of high surface area sludge-based activated hydrochar via hydrothermal carbonization and application in the removal of basic dye. *Environmental Research*, 175, 457-467. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.04.002>
- Kizinievič, O., & Kizinievič, V. (2017). Utilisation of drinking water treatment sludge for the manufacturing of ceramic products. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 251. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/251/1/012018>
- Li, J., Liu, L., Liu, J., Ma, T., Yan, A., & Ni, Y. (2016). Effect of adding alum sludge from water treatment plant on sewage sludge dewatering. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 4(1), 746-752. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2015.07.021>

- Li, W., Yue, Q., Tu, P., Ma, Z., Gao, B., Li, J., & Xu, X. (2011). Adsorption characteristics of dyes in columns of activated carbon prepared from paper mill sewage sludge. *Chemical Engineering Journal*, 178, 197-203. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2011.10.049>
- Li, W.-H., Yue, Q.-Y., Gao, B.-Y., Ma, Z.-H., Li, Y.-J., & Zhao, H.-X. (2011). Preparation and utilization of sludge-based activated carbon for the adsorption of dyes from aqueous solutions. *Chemical Engineering Journal*, 171(1), 320-327. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2011.04.012>
- Li, W.-H., Yue, Q.-Y., Gao, B.-Y., Wang, X.-J., Qi, Y.-F., Zhao, Y.-Q., & Li, Y.-J. (2011). Preparation of sludge-based activated carbon made from paper mill sewage sludge by steam activation for dye wastewater treatment. *Desalination*, 278(1-3), 179-185. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.05.020>
- Li, Y., Li, Y., Li, L., Shi, X., & Wang, Z. (2016). Preparation and analysis of activated carbon from sewage sludge and corn stalk. *Advanced Powder Technology*, 27(2), 684-691. <https://doi.org/10.1016/j.appt.2016.02.029>
- Li, Z., Jiang, N., Wu, F., & Zhou, Z. (2013). Experimental investigation of phosphorus adsorption capacity of the waterworks sludges from five cities in China. *Ecological Engineering*, 53, 165-172. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2012.12.038>
- Liu, Y., Zhuge, Y., Chow, C. W. K., Keegan, A., Li, D., Pham, P. N., Huang, J., & Siddique, R. (2020). Utilization of drinking water treatment sludge in concrete paving blocks: Microstructural analysis, durability and leaching properties. *Journal of Environmental Management*, 262. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110352>

- Londoño, J. F. R., & Carmona, D. E. G. (2016). Análisis e implementación de un proceso de compostaje para la valorización de los lodos provenientes de plantas de tratamiento de agua residual industrial. Universidad Católica de Manizales.
- Luciano, S. Y., Leticia, M. P., Alejandra, M. D., & Guzmán, S. (s. f.). Tratabilidad de los lodos producidos en la potabilización del agua. 10.
- Mahamud López, M., Gutiérrez Lavín, A., & Sastre Andrés, H. (1996). Biosólidos generados en la depuración de aguas (I): Planteamiento del problema. *Ingeniería del agua*, 3(2). <https://doi.org/10.4995/ia.1996.2698>
- Mansour, M. S. M., Abdel-Shafy, H. I., & El Azab, W. I. M. (2020). Innovative reuse of drinking water sludge for the treatment of petroleum produced water to enhance oil recovery. *Egyptian Journal of Petroleum*, 29(2), 163-169. <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2020.02.002>
- Manyuchi, M. M., Chiutsi, P., Mbohwa, C., Muzenda, E., & Mutusva, T. (2018). Bio ethanol from sewage sludge: A bio fuel alternative. *South African Journal of Chemical Engineering*, 25, 123-127. <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2018.04.003>
- Medina Carmona, Y. M. (2017). Evaluación a escala laboratorio de la viabilidad de recirculación de los lodos generados en el proceso de potabilización de agua en San Sebastián de Mariquita- Tolima. Universidad Nacional de Colombia.
- Mejía, D. C., & Alzate, N. O. (2018). Valorización de los lodos provenientes de las plantas de tratamiento de aguas residuales. Universidad Católica de Manizales.

Mendoza, F. J. C., Alberola, M. C., Prats, L. H., Izquierdo, A. G., & Bovea, M. D. (2009).

Viabilidad de la valorización energética de lodos procedentes de distintos tipos de depuradoras. 6.

Metcalf, & Eddy. (1995). Ingeniería de Aguas Residuales (Tercera edición, Vol. 2). McGrawHill.

Mills, N., Pearce, P., Farrow, J., Thorpe, R. B., & Kirkby, N. F. (2014). Environmental & economic life cycle assessment of current & future sewage sludge to energy technologies.

Waste Management, 34(1), 185-195. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.08.024>

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, R. de C. (2007). Gestión Integral de Residuos o Desechos Peligrosos: Bases Conceptuales.

Mohammadi, S., & Mirghaffari, N. (2015). A preliminary study of the preparation of porous carbon from oil sludge for water treatment by simple pyrolysis or KOH activation. New Carbon Materials, 30(4), 310-318. [https://doi.org/10.1016/S1872-5805\(15\)60192-5](https://doi.org/10.1016/S1872-5805(15)60192-5)

Molina, L. L. G., & Bermudez, A. M. M. (2016). Caracterización fisicoquímica de los lodos provenientes de una planta de tratamiento de agua residual industrial de una empresa de café del departamento de Caldas. Universidad Católica de Manizales.

Montero, M. A., Jordán, M. M., Hernández-Crespo, M. S., & Sanfeliu, T. (2009). The use of sewage sludge and marble residues in the manufacture of ceramic tile bodies. Applied Clay Science, 46(4), 404-408. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2009.10.013>

Muisa, N., Nhapi, I., Ruziwa, W., & Manyuchi, M. M. (2020). Utilization of alum sludge as adsorbent for phosphorus removal in municipal wastewater: A review. Journal of Water Process Engineering, 35, 101-187. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101187>

- Nair, A. T., & Ahammed, M. M. (2015). The reuse of water treatment sludge as a coagulant for post-treatment of UASB reactor treating urban wastewater. *Journal of Cleaner Production*, 96, 272-281. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.12.037>
- Orellana León, X. O. (2015). Uso de los lodos, producto del tratamiento de aguas residuales, para la fabricación de ladrillos. Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.
- Pacheco Jiménez, D., & Varela Gómez, K. V. (2019). Análisis estadístico comparativo del contenido de óxidos presentes en lodos sin calcinar, lodos calcinados y cemento Portland. Universidad de la Costa.
- Pacheco Tuesca, M. F., & Utria Lafaurie, M. (2019). Comportamiento de mezcla de concreto cemento Portland con adiciones de 5 y 10% de cenizas de lodos. Corporación Universidad de la Costa.
- Palacios Gonzáles, S. (2007). Aplicación de los lodos del sistema de tratamiento de aguas residuales de la compañía cervecera de Nicaragua. Universidad Nacional de Ingeniería.
- Piasta, W., & Lukawska, M. (2016). The Effect of Sewage Sludge Ash on Properties of Cement Composites. *Procedia Engineering*, 161, 1018-1024. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.842>
- Rabie, G. M., El-Halim, H. A., & Rozaik, E. H. (2019). Influence of using dry and wet wastewater sludge in concrete mix on its physical and mechanical properties. *Ain Shams Engineering Journal*, 10(4), 705-712. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2019.07.008>
- Ramírez, F. (2008). Lodos producidos en el tratamiento del agua potable. *Bogotá. Técnica Industrial* 275.

Reglamento técnico para el sector de agua potable y saneamiento básico. República de Colombia. Ministerio de Desarrollo Económico. Resolución N° 1096. RAS 2000. Noviembre 17,2000.

Rebolledo Lozano, G. A. (2020). Potential reuse of industrial sludge in the production of ceramic floor. *Ingeniería y competitividad*, 22(1), 1-12. <https://doi.org/10.25100/iyc.v22i1.8023>

Resolución 0330 de 2017. Junio 6 de 2017. Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. República de Colombia.

Rosli, N. A., Aziz, H. A., Selamat, M. R., & Lim, L. L. P. (2020). A mixture of sewage sludge and red gypsum as an alternative material for temporary landfill cover. *Journal of Environmental Management*, 263, 110420. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110420>

Rozenstrauha, I., Sosins, G., Petersone, L., Krage, L., Drille, M., & Filipenkov, V. (2011). Production of glass-ceramics from sewage sludge and waste glass. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 25. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/25/1/012016>

Rrong, W., Aiping, T., & Ashraf, M. A. (2016). The effects of applying sewage sludge into Jiangxi red soil on the growth of vegetables and the migration and enrichment of Cu and Zn. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 23(5), 660-666. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2015.10.028>

Salazar, C., Paola, Y., Gutierrez, R., & Bryan, G. (2014). Uso de los lodos generados en los decantadores de una planta de tratamiento de agua potable como materia prima para la elaboración de ladrillos de construcción.

- Sánchez de Rojas, M. I., Frías, F., Rivera, J., Escorihuela, M. J., & Marín, F. P. (2001). Investigación sobre la actividad puzolánica de materiales de desecho procedentes de arcilla cocida. *Materiales de Construcción*, 51(261), 45-52.
<https://doi.org/10.3989/mc.2001.v51.i261.379>
- Santana, D. (2018). Evaluación de la variación temporal de los constituyentes de lodos generados en diferentes plantas de tratamiento de aguas residuales del sector industrial, Estado Carabobo. Universidad de Carabobo.
- Shahin, S. A., Mossad, M., & Fouad, M. (2019). Evaluation of copper removal efficiency using water treatment sludge. *Water Science and Engineering*, 12(1), 37-44.
<https://doi.org/10.1016/j.wse.2019.04.001>
- Singh, A. D., Upadhyay, A., Shrivastava, S., & Vivekanand, V. (2020). Life-cycle assessment of sewage sludge-based large-scale biogas plant. *Bioresource Technology*, 309.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123373>
- Siswoyo, E., Qoniah, I., Lestari, P., Fajri, J. A., Sani, R. A., Sari, D. G., & Boving, T. (2019). Development of a floating adsorbent for cadmium derived from modified drinking water treatment plant sludge. *Environmental Technology & Innovation*, 14, 100312.
<https://doi.org/10.1016/j.eti.2019.01.006>
- Smol, M., Kulczycka, J., Henclik, A., Gorazda, K., & Wzorek, Z. (2015). The possible use of sewage sludge ash (SSA) in the construction industry as a way towards a circular economy. *Journal of Cleaner Production*, 95, 45-54.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.02.051>

- Suksong, W., Promnuan, K., Seengenyong, J., & O-Thong, S. (2017). Anaerobic Co-Digestion of Palm Oil Mill Waste Residues with Sewage Sludge for Biogas Production. *Energy Procedia*, 138, 789-794. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.10.068>
- Toro, J. G., & Guerrero, X. R. (2013). Caracterización fisicoquímica y microbiológica de los lodos presentes en la planta de tratamiento de aguas residuales industriales (PTARI) de la empresa de jugos Hit de la ciudad de Pereira. Universidad Tecnológica de Pereira.
- Torres, P., Hernández, D., & Paredes, D. (2012). Uso productivo de lodos de plantas de tratamiento de agua potable en la fabricación de ladrillos cerámicos. 27, 10.
- Vatachi, N. (2019). Wastewater sludge to energy production. A review. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 595. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/595/1/012053>
- Vieira, G. E. G., Rêgo, F., & Teixeira, L. F. (2017). Green bio-oil obtained from digested sewage sludge: New substitute bio-fuel to diesel oil in thermoelectric plants. *Energy Procedia*, 136, 463-467. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.10.304>
- Wu, L., Zhang, X., Liu, D., Peng, H., & Long, T. (2014). Activated Carbons Derived from Livestock Sewage Sludge and their Absorption Ability for the Livestock Sewage. *IERI Procedia*, 9, 33-42. <https://doi.org/10.1016/j.ieri.2014.09.037>
- Wu, X., Zhu, F., Qi, J., & Zhao, L. (2016). Biodiesel Production from Sewage Sludge by Using Alkali Catalyst Catalyze. *Procedia Environmental Sciences*, 31, 26-30. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.02.004>

- Xu, G. R., Yan, Z. C., Wang, Y. C., & Wang, N. (2009). Recycle of Alum recovered from water treatment sludge in chemically enhanced primary treatment. *Journal of Hazardous Materials*, 161(2-3), 663-669. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.04.008>
- Xu, Y., Chen, T., Liu, Z., Zhu, S., Cui, F., & Shi, W. (2016). The impact of recycling alum-humic-floc (AHF) on the removal of natural organic materials (NOM): Behavior of coagulation and adsorption. *Chemical Engineering Journal*, 284, 1049-1057. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.09.069>
- Yang, L., Wei, J., Zhang, Y., Wang, J., & Wang, D. (2014). Reuse of acid coagulant-recovered drinking waterworks sludge residual to remove phosphorus from wastewater. *Applied Surface Science*, 305, 337-346. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2014.03.081>
- Zhao, Y. Q., Babatunde, A. O., Hu, Y. S., Kumar, J. L. G., & Zhao, X. H. (2011). Pilot field-scale demonstration of a novel alum sludge-based constructed wetland system for enhanced wastewater treatment. *Process Biochemistry*, 46(1), 278-283. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2010.08.023>