

**Alternativas de aprovechamiento para biosólidos  
generados en el tratamiento de aguas residuales: Una  
revisión**

**Stefany Patiño Jiménez**

Química Industrial

Estudiante Maestría en Química

**Facultad de Ciencias Exactas y Naturales  
Maestría en Química - Universidad de Caldas  
Manizales, 2024**

**Alternativas de aprovechamiento para biosólidos  
generados en el tratamiento de aguas residuales: Una  
revisión**

**Por**

**Stefany Patiño Jiménez**

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de: Magister en química,  
modalidad profundización

**Directora:**

**Diana Marcela Ocampo Serna**

Dra. Ciencias Químicas

Profesora, Departamento de Química

**Programa Maestría en Química  
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales  
Universidad de Caldas  
Manizales, 2024**

Este trabajo se desarrolló como parte del proyecto financiado por MinCiencias,  
denominado:

**“Tecnologías alternativas para el tratamiento de aguas residuales de la industria textil” perteneciente a la CONVOCATORIA DE PROYECTOS CONECTANDO CONOCIMIENTO 852-2019, código: 202010034716**

Y Vicerrectoría de Investigaciones y posgrados por el proyecto de convocatoria conjunta 2019, código 0642720,

**Universidad de Caldas**

**Manizales, 2024**

**“El éxito es el resultado de pequeños esfuerzos, repetidos día tras día”**

**Robert Collier**

**“A mis padres y hermanas, por su motivación y amor incondicional que siempre me han  
conducido a alcanzar las metas propuestas”**

## **Agradecimientos**

Primeramente, agradezco a Dios por ser mi fortaleza y refugio en momentos de fragilidad, por permitirme crecer personal y profesionalmente, gracias a Dios por la vida de los que menciono a continuación y contribuyeron directa o indirectamente para el logro de este objetivo.

A mis padres Rubiela y Jaime que siempre me han brindado su apoyo incondicional para poder cumplir todos mis objetivos personales y académicos. Por la formación y educación que me han dado. Ellos que con su cariño me han impulsado a perseguir mis metas y nunca abandonarlas sin importar las adversidades, por ser mi soporte y el mejor ejemplo de tenacidad.

A mis hermanas por ser mis guías en el camino y mi ejemplo a seguir. A Marisol por enseñarme a valorar los resultados de mis esfuerzos por pequeños que parezcan y a disfrutar las pequeñas cosas de la vida, por haber sido el mejor ejemplo de resiliencia y optimismo. A Alejandra por su compañía, apoyo y exigencia que me han ayudado a pulir muchos aspectos en la vida, por ser una fuente constante de inspiración, motivación y el mejor ejemplo de perseverancia.

A mi directora la Dra. Diana Marcela Ocampo por su apoyo, cariño, compromiso, instrucción, dedicación, paciencia, motivación y actitud siempre disponible para transmitirme su conocimiento; por sus palabras de aliento y correcciones precisas para enriquecer este proyecto de manera significativa, por permitirme ser parte del semillero de

investigación del grupo de estudios ambientales en agua y suelo que han contribuido de forma grata en mi crecimiento integral.

A MinCiencias y vicerrectoría de investigaciones y posgrado de la Universidad de Caldas por los recursos que permitieron fortalecer el proyecto, asistir a eventos científicos de divulgación nacional e internacional y contribuir para culminar mis estudios de maestría como estudiante de profundización.

Finalmente, a todos los profesores que han contribuido a mi formación académica, por sus conocimientos, por encender mi curiosidad por esta ciencia e inculcarme el amor por aprender que la química es el arte de descubrir la naturaleza oculta de la materia, desentrañando sus secretos y abriendo el camino hacia un mundo de posibilidades infinitas.

## Contenido

<b>Índice de figuras .....</b>	<b>11</b>
<b>Índice de tablas .....</b>	<b>12</b>
<b>Tabla de abreviaturas .....</b>	<b>13</b>
<b>Resumen .....</b>	<b>15</b>
<b>Objetivos.....</b>	<b>16</b>
Objetivo General .....	16
Objetivos Específicos.....	16
<b>Capítulo I. Introducción .....</b>	<b>17</b>
<b>Capítulo II. Agua residual .....</b>	<b>20</b>
<b>Generalidades.....</b>	<b>20</b>
<b>Aguas residuales.....</b>	<b>23</b>
a) Doméstica.....	24
b) No doméstica.....	24
c) Residual industrial.....	25
d) Aguas lluvias.....	25
<b>Caracterización del agua contaminada o residual .....</b>	<b>26</b>
Propiedades físicas .....	27
Propiedades químicas .....	32
Propiedades biológicas .....	38
<b>CAPÍTULO III. Tratamiento de aguas residuales de origen doméstico .....</b>	<b>43</b>
<b>Planta Convencional para el Tratamiento del Agua Residual.....</b>	<b>45</b>
1) Tratamiento Preliminar.....	46
2) Tratamiento de tipo Primario .....	46
3) Tratamiento de tipo Secundario .....	46
4) Tratamiento de tipo Terciario.....	47
<b>Infraestructura y Diseño de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) “Los Cábulos” .....</b>	<b>52</b>



Características generales y estructurales .....	53
<b>CAPÍTULO IV. Tratamiento y estabilización de lodos .....</b>	<b>58</b>
<b>Características de los lodos .....</b>	<b>58</b>
Humedad .....	58
Materia orgánica.....	59
Nutrientes .....	59
Contaminantes químicos .....	60
Patógenos.....	60
<b>Tipos de lodos residuales .....</b>	<b>60</b>
Lodo crudo .....	61
Lodo primario.....	61
Lodo activo.....	61
Lodo secundario .....	62
Lodo digerido .....	63
<b>Clasificación de lodos residuales.....</b>	<b>63</b>
1. Concentración de metales pesados .....	63
2. Carga microbiológica .....	64
<b>Tratamiento de los lodos.....</b>	<b>66</b>
1. Operaciones preliminares .....	67
2. Espesamiento.....	67
3. Estabilización .....	68
4. Deshidratación.....	71
5. Acondicionamientos.....	72
6. Secado térmico .....	73
7. Desinfección.....	76
<b>Eficacia de los tratamientos.....</b>	<b>80</b>
<b>Microorganismos utilizados en los lodos.....</b>	<b>86</b>

1. Bacterias .....	86
2. Hongos .....	87
3. Protozoarios.....	87
4. Organismos multicelulares .....	87
<b>Normas para biosólidos y lodos de origen residual a nivel mundial.....</b>	<b>88</b>
Aspectos normativos nacionales.....	92
<b>Aprovechamiento de los lodos de origen residual .....</b>	<b>94</b>
<b>Usos alternativos de biosólidos.....</b>	<b>97</b>
<b>Capitulo V. Técnicas de reutilización de biosólidos .....</b>	<b>99</b>
<b>1. Energético.....</b>	<b>99</b>
a) Generación de biogás .....	101
b) Incineración.....	102
<b>2. Fertilizantes de tipo orgánico.....</b>	<b>103</b>
Precomposteo .....	104
Vermicomposteo.....	105
Operaciones Unitarias desarrolladas en el proceso de compostaje. ....	105
Factores determinantes en el proceso de compostaje .....	108
<b>3. Material de construcción.....</b>	<b>109</b>
Etapas que se llevan a cabo en el proceso de fabricación de ladrillos.....	110
<b>4. Rellenos sanitarios .....</b>	<b>113</b>
<b>Disposición de biosólidos en Colombia.....</b>	<b>116</b>
<b>Disposición de biosólidos a nivel mundial.....</b>	<b>119</b>
<b>VI. Conclusiones .....</b>	<b>122</b>
<b>Bibliografía.....</b>	<b>126</b>

## Índice de figuras

<b>Figura 1.-</b> Distribución de PTAR en Colombia.....	<b>21</b>
<b>Figura 2.-</b> Fuentes de aguas residuales y su distribución .....	<b>26</b>
<b>Figura 3.-</b> Sólidos y su metodología de análisis .....	<b>3030</b>
<b>Figura 4.-</b> Clasificación de los sólidos por tamaño de partícula .....	<b>31</b>
<b>Figura 5.-</b> Fases del tratamiento de aguas convencional .....	<b>45</b>
<b>Figura 6.-</b> Procedimientos de una planta de tratamiento convencional .....	<b>488</b>
<b>Figura 7.-</b> Distribución locativa de la planta de tratamiento de aguas residuales “Los Cámbulos” .....	<b>52</b>
<b>Figura 8 .-</b> Sistema propuesto de tratamiento para el agua residual.....	<b>577</b>
<b>Figura 9.-</b> Tipos de lodo generado según etapas del proceso de tratamiento.....	<b>62</b>
<b>Figura 10.-</b> Sistema general de tratamiento de lodo residual. ....	<b>79</b>
<b>Figura 11.-</b> Proceso de generación de biogas. ....	<b>102</b>
<b>Figura 12.-</b> Factores determinantes en el proceso de compostaje. ....	<b>1088</b>
<b>Figura 13.-</b> Esquema general de fabricación de ladrillos. ....	<b>1111</b>
<b>Figura 14.-</b> Disposición modular de relleno sanitario. ....	<b>1155</b>

## Índice de tablas

<b>Tabla 1.-</b> Valores de Conductividad del agua a 25° C .....	<b>29</b>
<b>Tabla 2.-</b> Parámetros cuantificables del agua residual y su método de análisis .....	<b>42</b>
<b>Tabla 3.-</b> Parámetros de elección del sistema de tratamiento del agua residual.....	<b>50</b>
<b>Tabla 4.-</b> Rendimiento de las líneas de tratamiento de la PTAR.....	<b>56</b>
<b>Tabla 5.-</b> Componentes químicos presentes en los lodos .....	<b>59</b>
<b>Tabla 6.-</b> Valores permisibles de metales pesados en lodos residuales .....	<b>65</b>
<b>Tabla 7.-</b> Clasificación de lodos según su carga microbiológica .....	<b>66</b>
<b>Tabla 8.-</b> Resultados de los tratamientos de los lodos residuales .....	<b>81</b>
<b>Tabla 9.-</b> Eficiencia de la ozonización a diferentes dosis .....	<b>84</b>
<b>Tabla 10.-</b> Límites permisibles de metales pesados en lodos .....	<b>90</b>
<b>Tabla 11.-</b> Valores límite permisibles de metales pesados en biosólidos.....	<b>91</b>
<b>Tabla 12.-</b> Valores límite de microorganismos patógenos y parásitos .....	<b>91</b>
<b>Tabla 13.-</b> Tipos de usos de los biosólidos.....	<b>92</b>
<b>Tabla 14.-</b> Normas de gestión ambiental municipal .....	<b>94</b>
<b>Tabla 15.-</b> Ventajas y desventajas del proceso de digestión anaeróbico .....	<b>101</b>

## Tabla de abreviaturas

°C	Grado(s) centígrado(s)
AASHTO	Asociación Americana de Oficiales de Carreteras Estatales y Transportes
ABSC	Absorción capilar
ABSS	Absorción sumergida
ABSE	Absorción de ebullición
atm	Atmósfera
BS	Base seca
CAR	Corporación Autónoma Regional
cm(s)	centímetro(s)
COT	Carbono Orgánico Total
CPN	Consejo Político Nacional
C/N	Unidades de carbono por unidades de nitrógeno
DANE	Departamento Administrativo Nacional de Colombia
DBO	Demanda Bioquímica de Oxígeno
DQO	Demanda Química de Oxígeno
ds/m	Diecisiemens por metro
EPA	Agencia Estadounidense de Protección al Ambiente
g	gramo(s)
GAM	Gestión Ambiental del Municipio
h	Hora
ha	Hectárea
Kcal	Kilo caloría(s)
Kg	Kilogramo(s)
KJ	Kilo Joule
Kwh	Kilowatt hora
L	Litro(s)
MS	Masa seca
mg	Miligramo(s)
mL	Mililitro(s)
mm	Milímetros

m <sup>3</sup>	Metros cúbicos
Mwh	Megawatt hora
n.d.	No disponible
NMP	Número Más Probable
NOM	Norma Oficial Mexicana
NTC	Norma Técnica Colombiana
OD	Oxígeno Disuelto
PCI	Poder Calorífico Inferior
PTAR	Planta de Tratamiento de Agua Residual
RMIT	Royal Melbourne Institute of Technology
SEMARNAT	Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales
s	segundo(s)
SDF	Sólidos Disueltos Fijos
SDM	Standard Methods
SDT	Sólidos Disueltos Totales
SDV	Sólidos Disueltos Volátiles
SM	Biosólido calcinado
SSF	Sólidos Solubles Fijos
SS	Sólidos Solubles
SST	Sólidos Solubles Totales
SSV	Sólidos Solubles Volátiles
STF	Sólidos Totales Fijos
ST	Sólidos Totales
STV	Sólidos Totales Volátiles
SW	Biosólido seco
UFC	Unidades Formadoras de Colonias
UNICEF	Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia
USCS	Unified Soil Classification System
UV	Ultravioleta
µm	Micrómetros

## Resumen

Actualmente los sistemas de plantas de tratamiento de agua residual (PTAR) han enfocado sus esfuerzos tanto en el recurso hídrico, como en los subproductos que se puedan obtener en este proceso; los lodos residuales son uno de los subproductos más importantes producidos en las PTAR, debido a la gran cantidad generada y el desaprovechamiento de su potencial, esta situación han conjugado una mayor concienciación, presión medioambiental y legislativa, que obliga a los gestores de los abastecimientos a replantear el sistema tradicional de las PTAR y redireccionarlo hacia la construcción de plantas de tratamiento de estos lodos, con el objetivo de extraer la materia sólida para sacar el mayor provecho de ella y obtener efluentes libres de lodos, que podrán ser vertidos al cauce o enviados a cabecera del tratamiento de la PTAR.

En este trabajo, se realizó una revisión bibliográfica acerca del agua residual, su tratamiento y las técnicas adecuadas para el tratamiento de lodos que permitan su reutilización de manera eficiente; la búsqueda se efectuó tanto a nivel internacional como nacional, fundamentada en las técnicas más utilizadas en el tratamiento de lodos provenientes de las PTAR; con el fin de plantear una propuesta que responda convenientemente a las alternativas de disposición final de estos subproductos que serán generados en la nueva planta de tratamiento de aguas residuales “Los Cambulos” de la ciudad de Manizales, Caldas, siendo una iniciativa amigable hacia el medio ambiente, adecuada a las condiciones climáticas, económicas y de locación del proyecto, que contribuyan a la conservación ambiental, al aprovechamiento de biosólidos de manera eficiente y responsable.

# Objetivos

## Objetivo General

Elaborar una revisión bibliográfica, en la búsqueda de alternativas de aprovechamiento para biosólidos generados en el tratamiento de aguas residuales.

## Objetivos Específicos

- I.** Analizar los tipos de tratamiento de agua residual más comunes y sus subproductos.
- II.** Describir el proceso de tratamiento y estabilización de lodos residuales generados por las plantas de tratamiento a nivel nacional e internacional.
- III.** Exponer opciones de aprovechamiento y reutilización de los biosólidos generados en una planta de tratamiento de agua residual de la ciudad de Manizales.



# Capítulo I. Introducción

El tratamiento de aguas residuales es un proceso esencial para mantener la salud pública y preservar el medio ambiente. A medida que la población mundial continúa creciendo y las actividades humanas se intensifican, convirtiendo la generación de aguas residuales en un desafío más significativo para las comunidades y las industrias, debido a la necesidad de un flujo circular de los recursos (Drangert & Kjerstadius, 2023). Para abordar este problema, se han desarrollado diversas tecnologías y procesos para tratar las aguas residuales de manera efectiva y segura, donde se disminuyan los riesgos para la salud y el medio ambiente (Drangert, 2020).

El tratamiento de aguas residuales implica varias etapas, que tienen como objetivo eliminar o reducir los contaminantes presentes en ella, antes de que pueda ser descargada de forma segura en el medio ambiente o reutilizarse en procesos de agricultura. Estas etapas pueden variar dependiendo del sistema de tratamiento utilizado, pero para tratamientos convencionales se incluyen cuatro etapas principales, entre las que se destaca el tratamiento preliminar para eliminar sólidos grandes y desechos, primario para eliminar sólidos en suspensión y materia orgánica, secundario enfocado en la eliminación de materia orgánica disuelta y otros contaminantes mediante procesos biológicos y por último el terciario que utiliza procesos físico-químicos avanzados para eliminar los contaminantes restantes, como nutrientes, metales pesados y compuestos orgánicos recalcitrantes (Barroso et al., 2019).

Sin embargo, el enfoque en el tratamiento de aguas residuales ha evolucionado más allá de la simple eliminación de contaminantes. Adicionalmente, ha surgido un creciente interés en

el aprovechamiento de los subproductos generados durante los procesos de tratamiento (Dolnicar et al., 2015; Naciones Unidas, 2022).

Una vez que se ha completado el tratamiento de las aguas residuales, los lodos generados, se someten a un proceso de estabilización, lo cual implica procesos adicionales de digestión anaeróbica, compostaje o deshidratación para reducir la presencia de microorganismos patógenos, transformándolos en biosólidos y haciéndolos más seguros para su manejo y reutilización (Maryam & Büyükgüngör, 2019; McKenna et al., 2023). Estos subproductos, como los biosólidos, presentan oportunidades para su reutilización en diversas aplicaciones, lo que aporta beneficios económicos, ambientales y sociales, permitiendo un reciclaje de nutrientes (McKenna et al., 2023).

Una de las aplicaciones sostenibles y beneficiosas de los biosólidos es su reutilización en la producción de ladrillos de construcción. Los biosólidos se agregan como un componente adicional a la en la mezcla de arcilla utilizada para fabricar ladrillos, ayudando a reducir la cantidad de desechos enviados a los vertederos, generando una reducción significativa en la utilización de recursos naturales no renovables (Muscarella et al., 2023a), contribuyendo a la gestión adecuada de los residuos y proporcionando una alternativa más sostenible y económica a los materiales de construcción convencionales. Además, la presencia de los biosólidos en la mezcla puede mejorar la calidad y propiedades del ladrillo, como la resistencia mecánica, la durabilidad y la capacidad de aislamiento térmico.

Esta revisión bibliográfica se encuentra estructurada en VI capítulos donde se explora la importancia del tratamiento de aguas residuales desde el pretratamiento hasta la obtención

de biosólidos estabilizados y se centra en la descripción general de la Planta de tratamiento de agua Residual “Los Cábulos” que está siendo construida en la ciudad de Manizales, Caldas detallando sus sistemas de: línea de agua, línea de sólidos, línea del biogás, sistema de manejo y la disposición de lodos y biosólidos descritos por el consorcio Hazen a cargo de la obra. También abarca las opciones de aprovechamiento de los subproductos generados durante este proceso y su reutilización en diversos sectores, como la agricultura, la generación de energía y la construcción, como alternativas que proporcionan soluciones sostenibles y provechosas. Además, se expondrán los beneficios y los desafíos respecto a una gestión adecuada y las regulaciones sólidas para garantizar la seguridad y la protección del medio ambiente.

El capítulo II contempla todas las generalidades sobre el agua residual, la importancia de su adecuada gestión, los tipos y clasificación de acuerdo con su origen y las características físicas y químicas más relevantes para el proceso de su tratamiento.

## Capítulo II. Agua residual

### Generalidades

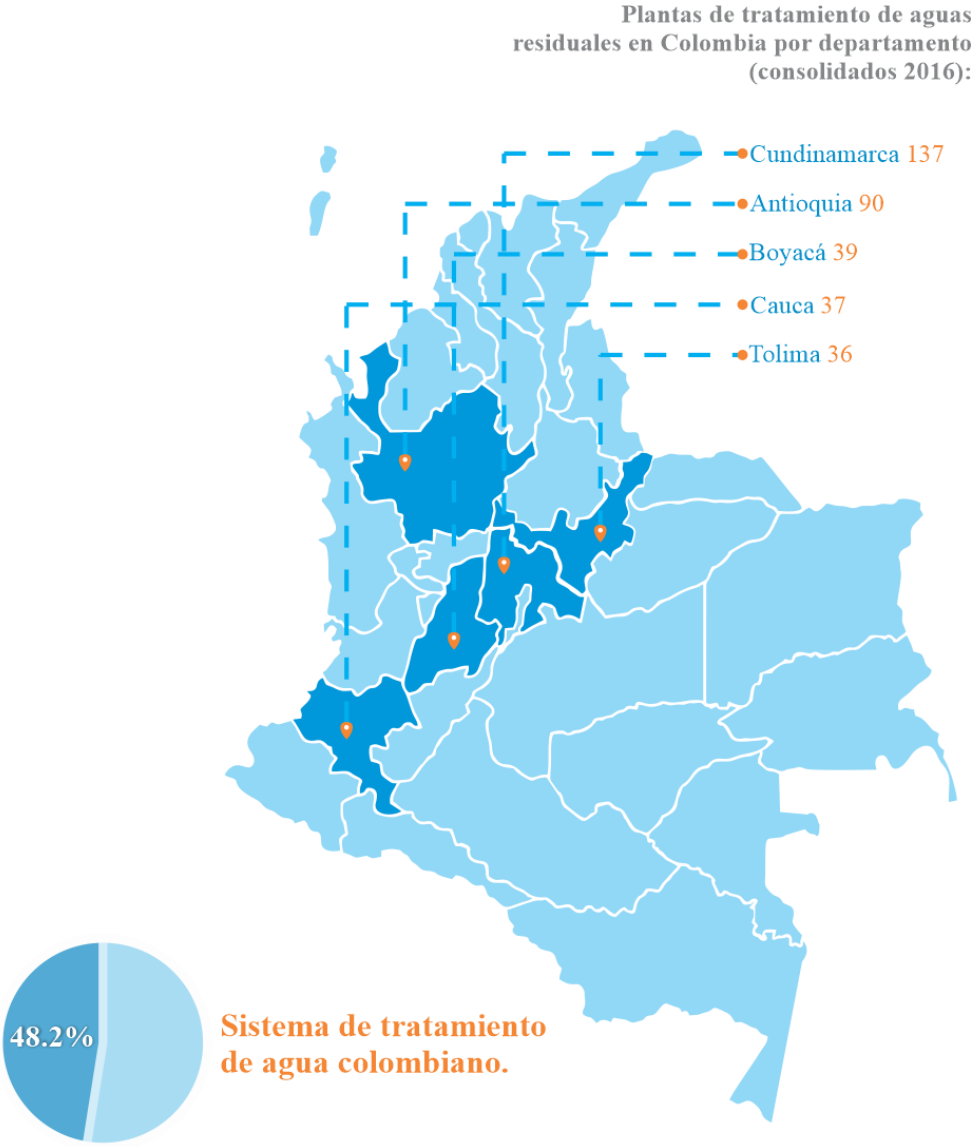
A escala mundial los seres humanos realizan diversas actividades domésticas e industriales que generan como subproducto agua contaminada o residual. Asimismo, el propio incremento en el número de habitantes en las poblaciones trae implícito consigo la producción de este residuo, el cual normalmente es vertido en las fuentes hídricas, provocando su contaminación, pues se descargan sin antes haberles proporcionado algún tratamiento adecuado que minimice el impacto ambiental negativo, lo que va deteriorando paulatinamente los ecosistemas acuáticos y se convierte también en una fuente de transmisión de enfermedades.(Estévez Valencia et al., 2019).

En este sentido y de acuerdo con la UNICEF, solamente 181 países han conseguido obtener un porcentaje superior al 75,0% en cuanto a la cobertura nacional de los servicios básicos del agua, pero únicamente un porcentaje correspondiente al 35,0% del agua contaminada residual es tratada previo a ser descargada en los mares y/o ríos (WHO and UNICEF, 2017a).

En Latinoamérica, por su parte el panorama es muy similar, ya que menos del 20,0% de la población tiene acceso a sistemas de saneamiento pertinentes para eliminar los contaminantes antes de que las aguas residuales se viertan en las fuentes hídricas (WHO and UNICEF, 2017b).

Ahora bien, particularmente en Colombia, según el reporte denominado “Estudio Sectorial de los Servicios Públicos Domiciliarios de Acueducto y Alcantarillado”, del año 2019, tal y

como se presenta en la Figura 1, del total de los municipios (1.122) que informa el DANE, solamente 541 poseen la infraestructura para tratar el agua residual (Superservicios, 2020), lo cual corresponde tan solo al 48,6% de plantas en funcionamiento.



**Figura 1.- Distribución de PTAR en Colombia, (Superservicios, 2020).**

-Fuente: Creación propia datos DANE.

De estas, según datos entregados en el 2020 a nivel nacional, se depuran 33.742 litros por segundo (L/s) de agua previo a su vertimiento (Superservicios, 2020), las PTAR que tratan mayor cantidad de caudal de aguas residuales están ubicadas en grandes ciudades, como:

- 1.) Cali con la PTAR Cañaveralejo, que trata un caudal de 6370 L/s, limpiando un total de 550 millones de litros de agua diariamente.
- 2.) Bogotá con la PTAR Salitre, que depura 4013 L/s y entrega aproximadamente 401 millones de litros de agua diariamente.
- 3.) Medellín con la PTAR Aguas Claras 3843 L/s, sanea 384 millones de agua con residuos.
- 4.) Cartagena con la PTAR Canoas, con una capacidad de tratamiento de 2938 L/s, limpiando unos 250 millones de litros diarios de agua contaminada.
- 5.) Barranquilla con el Pretratamiento Barranquillita, que entrega 185 Litros de agua saneada diariamente.

Aunque estas generarán enormes volúmenes de agua reutilizables, debido a la gran demanda de agua potable por el aumento poblacional e industrial y a las cantidades excesivas de agua contaminada, se han llegado a considerar las aguas residuales como una opción factible y alterna para obtener subproductos orgánicos y para generar energía limpia (Drangert, 2020), mediante metodologías novedosas de tratamiento que permitan tanto su reutilización como su recuperación (Cortés García, 2020). En este sentido, los gobiernos se han visto en la necesidad de promover mecanismos estructurales integrales y sostenibles para optimizar su calidad minimizando su contaminación y aprovechando su gran potencial.(IANAS, 2019).

No obstante, esta buena intención, los gobiernos se han encontrado algunos inconvenientes en los procesos de optimización de la calidad del agua, puesto que los mecanismos del alcantarillado tienen incorporados sistemas de desagüe que provienen de hospitales, industrias y domicilios (Skambraks et al., 2017), generando una matriz compleja y dificultando su tratamiento.

Por lo tanto, es necesario desarrollar una estructura de tratamiento que involucre características globales y completas de las diferentes condiciones medio ambientales, tales como la topografía, las comunidades vecinas, los componentes abióticos y bióticos, así como los aspectos culturales y socioeconómicos que puedan verse afectados, sin olvidar las propiedades microbiológicas y fisicoquímicas del cuerpo de agua que se va a tratar (Ministerio de la protección social, Ministerio de ambiente & territorial., 2007). Es por todas las razones anteriores, que en este capítulo se discutirá la conceptualización de las aguas residuales y de ciertas características que se encuentran frecuentemente en los afluentes de origen doméstico, así como su importancia e influencia en el desarrollo de las distintas fases del sistema de tratamiento.

## **Aguas residuales**

El término agua residual, hace referencia a las aguas que han sido utilizadas en actividades antropogénicas que afectan sus características organolépticas, sufriendo alteraciones fisicoquímicas y microbiológicas, debido a la introducción de materiales orgánicos, químicos y biológicos que hacen inapropiado su uso inmediato o liberación al medio ambiente sin un tratamiento previo. Las aguas residuales, también se denominan como material que proviene

de la contaminación doméstica y/o de los procesos de manufacturación de las industrias, que por motivos de salubridad y debido a las condiciones recreativas y estéticas, no se deben de descargar en las fuentes hídricas naturales sin haberles dado un tratamiento previo (Real Academia de la lengua Española, 1995.), ya que tienen una composición porcentual del 1,0% de materiales floculados y/o solubilizados, y el 99,0% restante de agua en estado líquido, por lo que pueden clasificarse de acuerdo a su procedencia en:

**a) Doméstica.** Son las aguas que provienen de zonas conformadas por casas que cuentan con servicios, producidas de manera principal por las actividades de la especie humana y de sus tareas domésticas (Real Academia de la lengua Española, 1995.). Por su parte, la resolución 631 de vertimientos emitida por el Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible en 2015 en Colombia, la define como el agua que proviene tanto de los domicilios como de las industrias y los comercios, de acuerdo con:

- 1) Procedencia de los servicios de atención a las necesidades fisiológicas humanas,
- 2) Provenientes de la higiene individual, de las áreas de preparación de alimentos y de limpieza personal, así como de la sanitización de la indumentaria (Ministerio De Ambiente Y Desarrollo sostenible, 2015), conformándose por un 0,1% de residuos insolubles orgánicos y por un 99,9% de agua líquida, teniendo un flujo volumétrico y una composición indeterminable.

**b) No doméstica.** De acuerdo con la resolución 631 de Colombia, son aquellas que se originan del uso industrial, de servicio y/o comercial (Ministerio De Ambiente Y Desarrollo sostenible, 2015), pero que se generan en las zonas urbanas, por lo que se

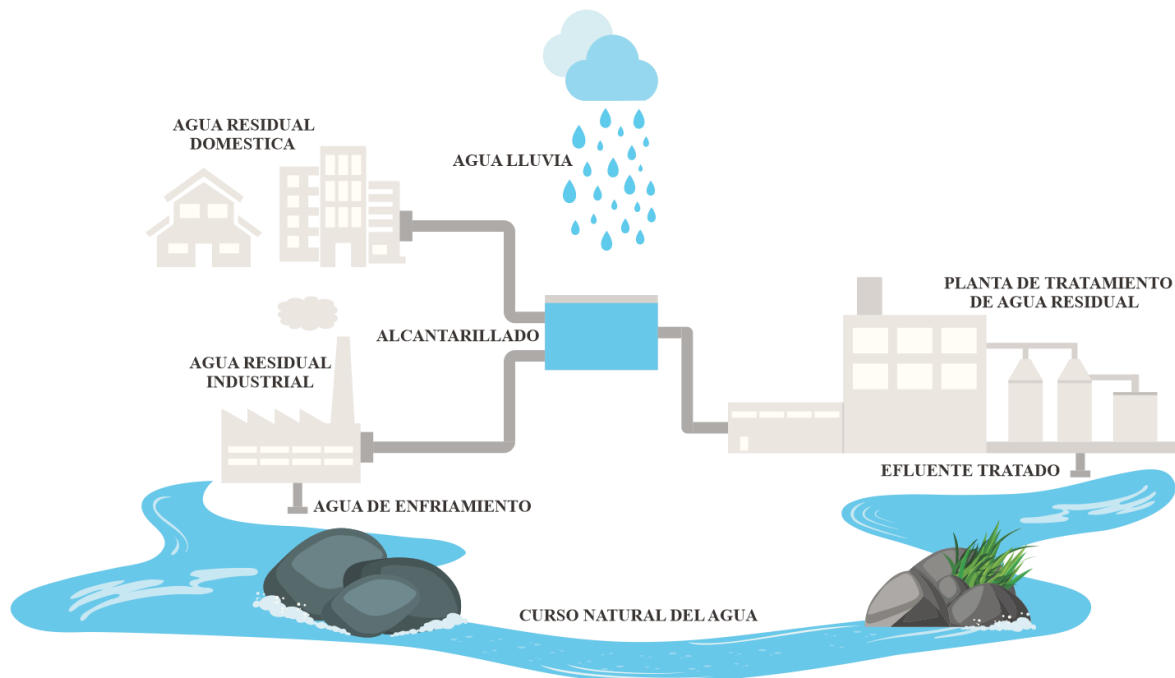


diferencian de las residuales industriales en que estas tienen su origen en los procesos de manufactura, teniendo una composición muy variable, pues depende de la actividad productiva. Pueden tener elevadas concentraciones de sustancias biológicas, químicas e inorgánicas, tanto biodegradables como no biodegradables.

**c) Residual industrial.** Proceden de las actividades de la industria, y se generan comúnmente fuera de las zonas urbanas. Deben recibir algún tipo de tratamiento previamente a ser descargadas en el sistema de alcantarillado, de acuerdo con lo establecido por las leyes reguladoras. Contienen una carga orgánica rica en grasas, aceites y compuestos recalcitrantes (Zakharov & Bondareva, 2015).

**d) Aguas lluvias.** Generadas por escorrentía de las precipitaciones atmosféricas. Son aguas con una mínima carga contaminante en comparación con las tres anteriormente mencionadas, pero tiene un caudal mucho mayor.

Además, en la gran mayoría de las zonas urbanas existen sistemas de alcantarillado que captan descargas combinadas de todos los tipos de agua residual (Drangert & Kjerstadius, 2023; Skambraks et al., 2017). Por ello, en la figura 2 se puede observar cómo se distribuyen las aguas residuales industriales y domésticas.



**Figura 2.- Fuentes de aguas residuales y su distribución.**

-Fuente: Creación propia con información de (Dursun et al., 2017) .

## Caracterización del agua contaminada o residual

Antes de describir los procesos implementados para mejorar la calidad de las aguas, es conveniente revisar los aspectos que definen y controlan dichos procesos de tratamiento. Las características que poseen las aguas residuales se dividen en físicas y químicas (Weber et al., 2021), dentro de las físicas se encuentran, la temperatura (Romero Rojas, 2004a), la turbidez (Jaume, 2020a), los sólidos insolubles (Arias, 2014), el color (Madrid, 2020), y el olor (Lazcano, 2016a); dentro de las químicas están, el pH (Rongwong & Sairiam, 2020a), la alcalinidad (Lazcano, 2016), cantidad de residuos orgánicos e inorgánicos (Remis Rojas R, 2011), el oxígeno disuelto (OD), la demanda química de oxígeno (DQO) (Lee et al., 2021a; Romero Rojas, 2004a) , entre otras, las cuales permiten establecer los parámetros adecuados para la selección del tipo de tratamiento y de las etapas del mismo (Ramalho et al., 2021),

que permitan obtener aguas acorde con la normativa y puedan ser vertidas en las fuentes hídricas naturales, implementando así una adecuada administración de la calidad medio ambiental.

## Propiedades físicas

En términos generales, las aguas residuales suelen ser turbias y presentar una coloración que varía desde tonalidades grises hasta marrones, dependiendo de la fuente de contaminación (Melero et al., 2020). Además, suelen tener olores desagradables debido a la presencia de compuestos orgánicos en descomposición. Algunas de las características físicas que permiten comprender mejor el impacto de las aguas residuales y la importancia de su tratamiento son:

**Olor.** Es una propiedad organoléptica sensorial subjetiva, ya que no existen instrumentos que lo puedan medir, no obstante, la NTC 4770 establece sus parámetros; generalmente las aguas con un tiempo de descarga menor a las seis horas, desprenden un olor sui generis característico, pero al convertirse en aguas sépticas, se empiezan a liberar los gases que se generan debido a la degradación de las sustancias orgánicas, particularmente los vapores del ácido sulfhídrico, produciendo olores bastante desagradables (Lazcano, 2016a).

**Temperatura.** Esta permite establecer un panorama general del lugar de procedencia del agua, debido a que un agua residual tiene una temperatura más elevada en contraste con el agua sin contaminar, pues está depende de la magnitud de las reacciones exotérmicas que se llevan a cabo. De modo que esta propiedad ejerce una gran influencia en los mecanismos de

la cinética química y biológica requeridos para que se desarrollen las distintas etapas del proceso de tratamiento (Romero Rojas, 2004a), y es determinable con la NTC 3645.

**Coloración.** Se evalúa por medio de la NTC 813, y su valor permite establecer una relación con respecto a la capacidad de absorción de la energía luminosa, a cuál depende de la concentración de las partículas. De esta manera, los ácidos húmicos le confieren una coloración amarillenta, la presencia del hierro una coloración rojiza y el manganeso una coloración oscura (Rigola Lapeña, 1989a). De manera general, el agua de contaminación reciente tiene una coloración grisácea, pero al avanzar las reacciones de degradación, la concentración del oxígeno disminuye, otorgando una coloración oscura, induciendo el estado séptico del agua (Madrid, 2020). Esta propiedad contribuye en la determinación del tipo de tratamiento, entre, la filtración, la coagulación, la adsorción con carbón activado y la cloración.

**Turbidez.** Permite establecer la cantidad de energía luminosa que puede atravesar al agua, y es dependiente de la concentración de los sólidos insolubles suspendidos en ella. Esta propiedad determina los tratamientos de coagulación, decantación y filtración (Jaume, 2020a); su cuantificación se efectúa a partir de la NTC 4707.

**Conductividad eléctrica.** Esta característica indica la concentración total de compuestos ionizables presentes, permitiendo establecer igualmente la concentración de las sales y de los minerales solubilizados, calculados a 25°C, y que de acuerdo con la tabla 1 se mide en microOhms por centímetro, mediante la NTC 4531, por medio de su capacidad para conducir electricidad. No obstante, esta no es contrastable con otra muestra porque es dependiente del

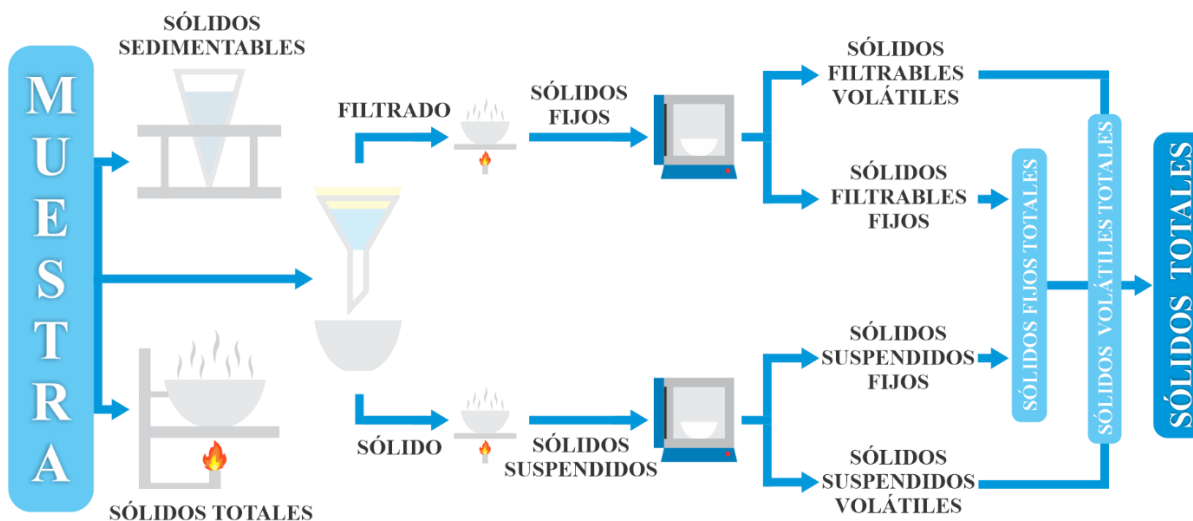
tamaño, la concentración y la carga eléctrica de las especies iónicas presentes. También permite determinar la calidad del agua (Olmos, 2003a; Vozmediano Collado, 2021).

**Tabla 1.- Valores de Conductividad del agua a 25° C**  
(Olmos, 2003a).

Calidad	Conductividad eléctrica ( $\mu\Omega/\text{cm}$ )
<b>Excelente</b>	Menor a 250,0
<b>Buena</b>	Entre 250,0 y 750.0
<b>Permisible</b>	Entre 750,0 y 2000,0
<b>Dudosa</b>	Entre 2000,0 y 3000,0
<b>Inservible</b>	Mayor a 3000,0

**Sólidos.** Estas partículas estiman la concentración de los elementos presentes en estado coloidal, y están constituidas por sustancias biológicas y químicas solubilizadas, se cuantifican con la NTC 897. Estos comprenden 5 tipos de sólidos, los cuales se esquematizan en la figura 3 junto con el método de análisis empleado en su determinación, y son: 1) totales, 2) sedimentables, 3) volátiles, 4) suspendidos, y 5) disueltos (Arias, 2014).

**Sólidos totales (ST).** Son residuos depositados a través de la descarga del agua residual que proviene de los hogares y de la industria (Llano et al., 2014), se miden posteriormente a la evaporación del agua durante 24 horas, por lo que de acuerdo con la Figura 4, se agrupan por tamaño en suspendidos y filtrables.



**Figura 3.- Sólidos y su metodología de análisis.**

Fuente: Creación propia con información de (Rigola Lapeña, 1989a).

- 1) **Sólidos disueltos totales (SDT).** Corresponden a partículas con un diámetro semejante al de los coloides y los iones, es decir, aquellos que atraviesan un filtro con diámetro de poro de 2  $\mu\text{m}$ , su valor hace posible conocer la concentración de las sales y de los residuos biológicos, (Castellanos Alfonso & Monsalve Alfonso, 2017) además proporcionan una referencia de la eficiencia del tratamiento físico y biológico. A su vez, se agrupan en: volátiles (SDV), que se eliminan al calentar el agua a 500  $^{\circ}\text{C}$ ; y fijos (SDF), que constituyen la materia orgánica remanente.
- 2) **Sólidos sedimentables (SS).** Son partículas que precipitan al colocar en reposo 1L de agua en un cono Imhoff por 1 hora (Maceo, 2013) sus resultados se expresan en mL/L. Se utiliza en la determinación del número de unidades de sedimentación. Estos sólidos se eliminan por coagulación previa a la sedimentación.

**3) Sólidos suspendidos o no filtrables (SST).** Componentes flotantes, como fragmentos de basura, insectos, vegetales, y sustancias biológicas, microorganismos y lodos, entre otras. También son partículas que se pueden separar utilizando medios físicos simples, representan la fracción remanente tras la filtración del agua en filtros con un diámetro de poro de  $1,2 \mu\text{m}$  (Romero Rojas, 2004a). Permiten tener una visión de la cantidad de lodo a retirar mediante los procesos de sedimentación.

**4) Sólidos volátiles.** Son las partículas que permanecen después de la incineración de los sólidos totales a  $500 \text{ }^\circ\text{C}$  por 1 hora.



**Figura 4.- Clasificación de los sólidos por tamaño de partícula.**

Fuente: Adaptación de (Castellanos et al., 2017) .

El agua residual también posee características químicas que desempeñan un papel importante en la modificación del entorno de las fuentes hídricas, así como del ambiente terrestre por el que se desplaza, alterando el equilibrio natural de los ecosistemas y produciendo dificultades para el tratamiento de las aguas residuales.

## Propiedades químicas

Las propiedades químicas, están en función de la concentración de materia orgánica contenida en las aguas, encontrándose de manera importante aceites, fenoles, grasas, proteínas, pesticidas y sustancias tensoactivas, así como también desechos inorgánicos como lodos, arena, arcilla y grava no biodegradable (Sdiri et al., 2020). Así, entre las características químicas más relevantes se encuentran:

**pH.** Permite conocer la concentración de los iones del hidrógeno en el agua, para establecer el nivel de alcalinidad y/o acidez de esta, es medida por la NTC 3651. Los valores que permiten el desarrollo de la vida acuática corresponden al rango entre 5 a 9 (16). De modo que valores con pH alcalino o básico, aumentan la concentración del  $\text{NH}_3$  (amoníaco), convirtiendo en tóxico el medio para dichos organismos (Rongwong & Sairiam, 2020a).

**Alcalinidad o basicidad.** Es la capacidad neutralizante del agua con respecto a las sustancias ácidas, ya que reacciona con los iones hidronio ( $\text{H}^+$ ), estableciendo la concentración total de las especies alcalinas, tales como, carbonatos, bicarbonatos, silicatos, fosfatos, boratos y los hidróxidos (Lazcano, 2016a; Mijares, 1967a). Su valor, calculado por la NTC 4803-2, se utiliza para determinar si las aguas del afluente necesitan ser sometidas a un proceso de desmineralización, decarbonatación o intercambio iónico (Rigola Lapeña, 1989a).

**Acidez.** Cuantifica la capacidad neutralizante de las aguas con respecto a las sustancias alcalinas o básicas de carácter fuerte a un pH correspondiente a 8,2. Su valor, estimado por medio de la NTC 4803-1, se utiliza para determinar el poder corrosivo del agua, ya que posee



compuestos como dióxido de carbono no combinado, ácidos de origen mineral y determinadas sustancias básicas de carácter fuerte y/o débil en disolución (Carlos Alberto Severiche Sierra & Barrios, 2013a). Con este parámetro se determina el grado de alteración del equilibrio dióxido de carbono-bicarbonato-carbonato acuoso, a la vez que permite la identificación del requerimiento de implementación de una fase de neutralización en el pretratamiento del agua.

**Dureza.** Establece la cantidad de cationes presentes que tienen la capacidad de reacción y de formación de sólidos precipitables, que son los responsables de la generación de la espuma (Kaur, 2021a). Con este parámetro, determinado mediante la NTC 4706 se estipula la necesidad de implementar fases de desmineralización y/o ablandamiento del agua, para impedir que los lodos se incrusten o depositen en las paredes de las tuberías de conducción.

**Cloruros.** Medido como ión cloruro, permite determinar el grado de salinidad del agua (Carlos Alberto Severiche Sierra & Barrios, 2013a), es importante pues altera el nivel de potabilización y su factible utilización industrial y agrícola. Este ión se infiltra a través de la interfase del recubrimiento protector de las tuberías, causando su corrosión e incrementando la conductividad (Rigola Lapeña, 1989a), es cuantificable por medio del análisis SM-4500-CI-B.

**Aluminio.** En las fuentes hídricas se encuentra en forma de sales (Corral-Bobadilla et al., 2020a), aunque de igual forma es parte de los residuos producidos al potabilizar el agua en las etapas de floculación (Rigola Lapeña, 1989a). Se determina con la NTC 4785.

**Nitritos y Nitratos.** El ión Nitrato, generalmente se encuentra formando sales estables y solubles, no obstante, en ambientes de carácter reductor se transforma en ión Nitrito, nitrógeno y/o amoníaco, haciendo factible el desarrollo de las algas (Rigola Lapeña, 1989a). De este modo, se considera como un importante indicador de la calidad acuosa (Altiparmaki et al., 2022a), ya que proceden del uso de los fertilizantes inorgánicos agrícolas (Ministerio de la protección social; Ministerio de Ambiente, 2007; Xie et al., 2021a); sus valores se estiman mediante la NTC 4782.

**Sulfatos.** Causa la síntesis de sales de solubilidad moderada; cuando reaccionan con los iones del calcio forman el sulfato de calcio, el cual puede incrustarse en las paredes de las tuberías, indicando contaminación de origen industrial (Hudaib, 2021a). Su evaluación se realiza a través del análisis SM-4500  $\text{SO}_4^{2-}$ . De manera general las bacterias reducen este compuesto formando Sulfuro de hidrógeno, que posee un olor desagradable (EPA, 2007a; Rigola Lapeña, 1989a)

**Fosfatos.** Se encuentran disueltos, formando coloides o partículas sólidas, su presencia indica contaminación agrícola derivada del uso de fertilizantes (Rigola Lapeña, 1989a) y de excreciones humanas (EPA, 2007a; Lalli, 2007) así como de detergentes. Su cuantificación se efectúa con la NTC 5604. También, forma precipitados en forma de Fosfato cálcico, que incrementa la basicidad. Una concentración elevada produce la eutrofización y reducción del oxígeno biodisponible (Pütz P, 2008).

**Cromo total.** Proviene de desechos industriales, su grado de toxicidad depende de su estado de oxidación. Este parámetro representa la suma del cromo en estado hexavalente, que se

considera como un compuesto de elevado riesgo cancerígeno (Safety & Chemicals, 2013a), en el estado trivalente se considera como un elemento traza en la dieta de los mamíferos (Rodier, 1990). Se estima su valor por la NTC 6283. Además, mediante los procesos de precipitación y reducción se alcanzan niveles controlados (APHA-AWWA-WEF, 2005).

**Otros componentes aniónicos.** Los componentes de tipo fenólico son el resultado de los residuos industriales que alteran la capacidad potabilizante del agua, produciendo olores desagradables posteriormente al proceso de cloración (Patel & Desai, 2022), igualmente ocasiona la alteración del sabor (Y. Wang et al., 2022), contribuyendo a una elevada demanda de oxígeno (Romero Rojas, 2004a). Otros componentes aniónicos como los detergentes no son biodegradables (Rigola Lapeña, 1989a), y sus agentes tensoactivos promueven la formación de la espuma en las etapas de coagulación y floculación (Chen et al., 2019), causando la disminución de la solubilidad del oxígeno (Joseph et al., 2021), lo cual interfiere en la vida animal y vegetal. Estos componentes se analizan utilizando la NTC 2123.

**Metales.** El manganeso, magnesio, calcio y el hierro se encuentran en concentraciones trazas, alterando algunas características del agua (Col., 2004) como la dureza (Panhwar et al., 2022a), el color y la salinidad. Por su parte, los metales pesados provocan graves alteraciones en el desarrollo de la vida acuática (Pabón Guerrero et al., 2020) y pueden estimular la manifestación de diversas patologías humanas.

**Sodio y Potasio.** Las sales de potasio y sodio son difíciles de precipitar, pues poseen una elevada solubilidad (Appiah-Brempong et al., 2022; Rigola Lapeña, 1989a); son determinables a través de la NTC 4124.

**Calcio.** En la forma de ión calcio, posee una solubilidad moderada que puede precipitar fácilmente (Rigola Lapeña, 1989a), además de influir en la dureza del agua y en posibles incrustaciones en las paredes de las tuberías (M. C. M. Van Loosdrecht et al., 2019). Se estima mediante el análisis SM-3111 D.

**Magnesio.** En la forma de ión magnesio forma sales difíciles de precipitar, al cual se le atribuye el desarrollo del sabor amargo del agua potable, además influye en la dureza del agua. Se controla por medio del proceso del intercambio iónico (Rigola Lapeña, 1989a). El valor de este parámetro se calcula mediante el análisis SM-3111 B (Carlos Alberto Severiche Sierra & Barrios, 2013a).

**Metales pesados.** Proviene de los desechos industriales, entre estos se encuentran el mercurio (NTC 4784), el plomo (NTC 4254), el hierro (SM-3500-Fe D), el cobre (NTC 4254), el zinc (SM-3111 B), el cadmio (NTC 4254), el cromo (NTC 6283), el manganeso (SM-3500-Mn C) y el níquel (SM-3111 B) (Dursun et al., 2017). Su presencia es la causa del envenenamiento de los seres vivos, pues se acumulan en el organismo (Conhydra, 2018; Galvis & Rivera, 2013) estas sustancias intervienen de manera negativa en los tratamientos biológicos convencionales.

**Material orgánico.** Este se compone de aceites, grasas, proteínas y carbohidratos procedentes de los productos biológicos de desecho de la especie humana, así como de residuos de detergentes y alimentos, en un porcentaje del 90,0%, todos los cuales son biodegradables (Jaume, 2013). La urea se degrada muy rápidamente en el agua, por lo cual es muy raro hallarla en aguas recién vertidas (Remis Rojas R, 2011). De igual modo se

encuentran compuestos de origen orgánico sintético en muy pequeñas concentraciones, como los fenoles, tensoactivos y pesticidas procedentes de la actividad agrícola (Olmos, 2003a).

**Carbono orgánico total.** También conocido como COT, mide la concentración del material de origen orgánico presente en las aguas, con su determinación por medio de la NTC 4781, se evalúa la calidad del agua, de modo que altas cantidades provocan una reducción del oxígeno biodisponible, causando efectos adversos en la vida acuática.

**Material de origen inorgánico.** Están incluidos todos aquellos residuos sólidos de procedencia mineral, como arena, arcilla, sales minerales, lodos y grava no biodegradable.

**Gases.** Se evalúan a través de la NTC ISO 5667, siendo el oxígeno disuelto el de mayor relevancia, ya que se consume mediante la acción biológica y química. Este impide el desarrollo del hedor fétido. Su concentración está en función de la agitación, la actividad química, biológica, la altitud y la temperatura, entre otros (Ministerio De Ambiente Y Desarrollo sostenible, 2015).

**Ácido sulfhídrico.** Se produce debido a la degradación del material de origen orgánico compuesto por azufre y/o por el proceso de reducción de los sulfatos y sulfitos de origen mineral. Se detecta su existencia a través del olor característico generado, que indica la condición en que se encuentran las aguas (Ministerio De Ambiente Y Desarrollo sostenible, 2015).

**Dióxido de carbono.** Es producido mediante los procesos fermentativos del material de origen orgánico presente en el agua (Zakharov & Bondareva, 2015).

**Metano.** Es producto de la degradación anaerobia del material de origen orgánico mediante el proceso reductivo del dióxido de carbono por las bacterias (Lazcano, 2016a).

**Otros gases.** Se incluyen los gases procedentes del nitrógeno y de los ácidos grasos de tipo volátil (Jaume, 2013).

## Propiedades biológicas

Estas características se definen de acuerdo con la clase de microorganismos ubicuos de las aguas (Osorio Rivera et al., 2021), entre los cuales se destacan:

**Bacterias.** Desempeñan una actividad esencial en la degradación y equilibrio del material de origen orgánico. Su clasificación se realiza de acuerdo con el tipo de metabolismo, entre las que están:

- 1) **Autótrofas.** Que obtienen sus nutrientes del material de origen inorgánico, empleando la energía luminosa para efectuar la biosíntesis, se dividen en fotosintéticas de las familias *Thiorhodaceae* y *Chlorobiacea* y quimiosintéticas como las *Thiotrix*, *Hydrogenomonas*, *Nitrosomonas* y *Nitrobacter*.
- 2) **Heterótrofas.** Son las de mayor relevancia en el tratamiento de agua debido a sus requerimientos nutricionales de material orgánico.

De igual manera, ambos tipos de bacterias (heterótrofas y autótrofas), se clasifican también de acuerdo con sus requerimientos de oxígeno en (Llano et al., 2014):

- a) **Anaerobias.** Estas no proliferan en medios oxigenados, pues obtienen el oxígeno mediante la degradación del material inorgánico y orgánico. Se caracterizan por producir

olores desagradables (Bermeo Barreto e Idrovo, 2014). El género más abundante es el *Clostridium sp* (Barranco Herrero, 2023), que poseen la capacidad de formar esporas.

**b) Aerobias.** Estas requieren del oxígeno disuelto para su proliferación. Su metabolismo está caracterizado por la ausencia de olores desagradables al degradar el material orgánico existente (Freire Alegria, 2023).

**c) Facultativas.** Proceden de los dos grupos anteriores que se han adaptado a un ambiente característico, en otras palabras, pueden proliferar bajo condiciones anaerobias y aerobias de oxígeno (Mijares, 1967a).

**Coliformes.** Estos se utilizan como índice de contaminación patógeno. Son ubicuos del tracto gastrointestinal de la especie humana y de especies de sangre caliente. Está incluida la *Escherichia coli* (Fragoso, Castilla et al., 2021), que indica contaminación de origen fecal, y el género *Aerobacter*.

**Algas.** Están en los tanques de estabilización y generan oxígeno mediante la fotosíntesis, consumiendo sustancias de origen inorgánico, en especial requieren del dióxido de carbono y de los compuestos derivados del fósforo y del nitrógeno (Guanin & Reatiqui, 2022); también requieren de cobre y de hierro, entre otros. Sin embargo, debido a su rápida proliferación y a la eutrofización del agua, crean extensas colonias que llegan a cubrir toda la superficie del agua en el tanque de estabilización, ocasionando dificultades en el proceso (Sdiri et al., 2020). Dentro de los tipos de géneros y especies de mayor relevancia están:

- 1) *Chlorophyta sensu lato* o algas verdes.
- 2) *Volvocales euglenophyta* o algas verdes móviles.

3) *Chrisophyta* o algas verde-amarillas o marrón-dorado.

4) *Cyanophyta* o algas verdeazuladas.

**Demanda Química de Oxígeno (DQO).** Este parámetro de calidad del agua se refiere a la concentración de oxígeno que se requiere para llevar a cabo la oxidación química, tanto biodegradable como no biodegradable, del material de origen orgánico que está contenido en el agua (Lee et al., 2021a; Romero Rojas, 2004a); se determina mediante la NTC 3629.

**Demanda bioquímica de oxígeno (DBO).** Es un parámetro que permite medir el grado de contaminación del agua, tanto superficial como residual durante los primeros cinco días tras ser vertida, ya que cuantifica la concentración del oxígeno que está disuelto en esta, y que es consumido por los microorganismos presentes para llevar a cabo el proceso bioquímico de la oxidación del material de origen orgánico de característica biodegradables bajo condiciones de aerobiosis (Mijares, 1967a). Se estima por medio de la NTC 3630.

Asimismo, la DBO fundamenta su importancia en que permite administrar la calidad técnica del agua, puesto que establece la concentración requerida del oxígeno para obtener la estabilización biológica del material de origen orgánico (Rongwong & Sairiam, 2020a).

La DQO es una medida que considera también la DBO, debido a que determina el valor de oxígeno necesario para que se lleve a cabo la oxidación completa de todo el material orgánico presente en la muestra, por ende, su valor siempre debe ser mayor al de la DBO; la relación DQO/DBO varía de acuerdo con el tipo de agua; a medida que un agua residual pasa por diferentes etapas de tratamiento esta relación tiende a ser mayor debido a la reducción de la



fracción biodegradable. Esta relación es importante ya que permite establecer el origen del agua residual y el tipo de tratamiento adecuado que se requiere implementar.

Para aguas de origen domestico este valor puede variar entre 1,70 – 2,50 a diferencia de las aguas provenientes de actividades industriales cuyo rango es muy amplio (Von Sperling & Ambiental, 2014.). Un valor de DQO/DBO bajo ( $<2,50$ ) indica un agua fácilmente biodegradable por lo cual es adecuado someterla a tratamientos biológicos, un valor intermedio ( $2,50 - 4,00$ ) indica una matriz de agua que debe ser sometida a pruebas de tratamiento para utilizar el más adecuado y finalmente una relación elevada ( $> 4,00$ ) indica una porción de sustancias inertes altas por lo cual se requiere un sistema de tratamiento fisicoquímico.

Ahora bien, como resumen, se presentan los parámetros antes mencionados en la tabla 2, describiendo la metodología utilizada en su determinación y la información relevante que aportan en el tratamiento del agua residual. Todas las características tanto físicas como químicas presentadas anteriormente, contribuyen en la definición del diseño requerido para las etapas de tratamiento, según el tipo de agua que se desee tratar, que permitan obtener vertimientos de aguas tratadas con características acorde con la normativa vigente y que contribuyan al mejoramiento de la calidad del medio ambiente, por ello el Capítulo III concentra la información respectiva al tratamiento de aguas residuales de origen doméstico.

**Tabla 2.- Parámetros cuantificables del agua residual y su método de análisis.**

Propiedad	Qué identifica	Técnica	Referencias
<b>pH</b>	Desarrollo de la vida biológica	Potenciométrico	(Lee et al., 2021b)
<b>Color</b>	Sustancias orgánicas disueltas	Espectrofotometría/visual	(Rigola Lapeña, 1989b)
<b>Olor</b>	Calidad y edad del agua	Organoléptico	(Lazcano, 2016b)
<b>Turbiedad</b>	Materiales suspendidos	Netfelmétrico	(Jaume, 2020b)
<b>Conductividad</b>	Constituyentes iónicos	Conductímetro	(Romero Rojas, 2004b)
<b>Temperatura</b>	Evaluación de otros parámetros	---	(Romero Rojas, 2004b)
<b>Sólidos</b>	Sustancias de gran tamaño y estabilidad biológica de fangos	Gravimétrico	(Castellanos & Monsalve, 2017)
<b>Análisis Volumétricos</b>			
<b>Alcalinidad</b>	Hidróxidos, carbonatos y bicarbonatos	---	(Lazcano, 2016)
<b>Acidez</b>	Corrosión	---	(Severiche & Barrios, 2013b)
<b>Dureza</b>	Presencia de cationes	Titulométrico con EDTA	(Kaur, 2021b)
<b>Cloruros</b>	Corrosión	Argentométrico	(Severiche & Barrios, 2013b)
<b>Análisis Colorimétricos</b>			
<b>Aluminio</b>	Calidad del agua	Espectroscopía atómica	(Corral Bobadilla et al., 2020b)
<b>Nitrato</b>	Impedir desarrollo de enfermedades	Espectroscopía UV	(Altiparmaki et al., 2022b; Xie et al., 2021b)
<b>Sulfato</b>	Solubilidad	Complexométrico	(Hudaib, 2021b)
<b>Cromo hexavalente</b>	---	---	(Safety & Chemicals, 2013b)
<b>Fosfato</b>	---	Digestión/titulación	(Pütz, 2008)
<b>Análisis de Metales</b>			
<b>Cu, Ni, Zn, Na, Mg, Mn, Se, Mb, Cr</b>	Contaminación tóxica	Absorción atómica	(Panhwar et al., 2022b)
<b>Análisis Orgánicos</b>			
<b>COT</b>	Disponibilidad del oxígeno	Ignición	(Olmos, 2003b)
<b>DQO/DBO</b>	Biodegradabilidad del material orgánico	Digestión-titulación/Winkler	(Rojas Remis R, 2011)
<b>Análisis Microbiológicos</b>			
<b>Coliformes</b>	Contaminación fecal	Filtración por membrana	
<b>Salmonella sp</b>	Identificación	Siembra	

## **CAPÍTULO III. Tratamiento de aguas residuales de origen doméstico**

La herramienta principal para efectuar el cuidado, la protección y la reutilización de los recursos hídricos, es la depuración y el tratamiento de las aguas de desecho, por ello diariamente se producen investigaciones que dan a conocer los procedimientos interdisciplinarios desarrollados en el ámbito de la bioquímica, la biología, la química y la mecánica (Van Loosdrecht, 2016; Ramírez & Medina, 2021).

Por ello las plantas que dan tratamiento al agua de desecho están constituidas por un conjunto de operaciones y procedimientos realizados con el objetivo de conseguir la depuración de este tipo de agua hasta alcanzar un grado de calidad que permita introducirla o reutilizarla de una manera más segura para el medio ambiente (Ramalho et al., 2021), ya que dichos procedimientos consiguen eliminar cualquier tipo de contaminante sólido, así como la descomposición del material orgánico presente.

De esta forma, el nivel de tratamiento que se debe de proporcionar para sanear el agua es dependiente de las características de la fuente hídrica de que se trate, por lo cual se utilizan conjuntamente diversas metodologías, que van desde procesos químicos y físicos, hasta microbiológicos y biológicos, con la finalidad de suprimir cualquier elemento indeseable. Así, con las metodologías físicas se pueden retirar los contaminantes utilizando mecanismos naturales (gravedad, membranas, filtros y rayos UV) en la desinfección, puesto que las membranas han incrementado su uso porque otorgan una elevada calidad al agua, y excluyen compuestos farmacéuticos, pesticidas y micro contaminantes (Dursun et al., 2017).

Existen tratamientos de agua residual doméstica a pequeña escala que permiten un nivel secundario de descontaminación a través de la remoción de arenas e inyección de aire que para oxidar contaminantes (Castro, 2018).

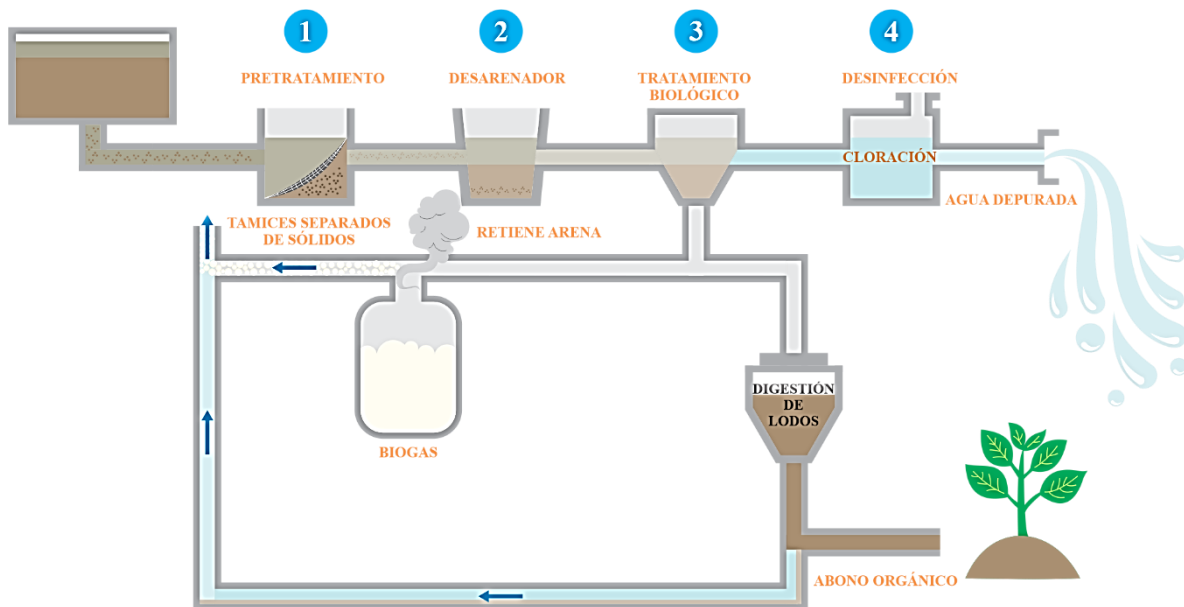
- 1) **Trampas de grasa:** Utilizan tanques pequeños de flotación para retener la grasa que sale a la superficie, mientras el agua se descarga por la parte inferior.
- 2) **Tanque séptico:** Son tanques subterráneos, utilizados en saneamiento rural para áreas desprovistas de redes de alcantarillado, este sistema requiere un postratamiento bien sea de trinchera o filtros intermitente para recoger y descargar al efluente final (Ministerio de Desarrollo Económico Dirección de Agua Potable y Saneamiento Básico, 2000).
- 3) **Humedales con filtros de lecho de raíces:** Constan de un tanque de baja altura empacado con grava o piedra en el cual se siembran plantas que le permiten fluir al agua residual de manera subsuperficial, utilizando la sedimentación, la adsorción y el metabolito bacteriano para generar agua que puede ser reutilizada para riego de áreas verdes, descarga en sanitarios, lavado de automóviles y calles (Díaz Cuenca et al., 2012).

Generalmente para el tratamiento de aguas residuales domésticas a gran escala se usan técnicas de tipo convencional, que consta de una infraestructura de gran tamaño diseñada para tratar grandes volúmenes de agua, atendiendo a las necesidades productivas y de la vida cotidiana de la población que beneficia, a continuación, se analizará una planta convencional de tratamiento.

## Planta Convencional para el Tratamiento del Agua Residual

Las metodologías de tipo convencional tienen un diseño adecuado acorde a las características del agua a tratar, además de poseer trazabilidad mediante cuatro fases básicas para el tratamiento, como se muestra en la figura 5 que son: tratamiento de tipo preliminar o pretratamiento, tratamiento primario, tratamiento de tipo secundario y tratamiento terciario, que se aplicarán de conformidad con los contaminantes a eliminar en cada una de las fases; en la figura 5 se describen las características de cada de cada una de estas etapas.

Por otra parte, y de conformidad con las normas técnicas de actualidad, los procedimientos tecnológicos para tratar el agua residual se pueden agrupar de acuerdo con el porcentaje de eficacia en la eliminación de las características que son de importancia sanitaria y/o ambiental, tales como los aceites y las grasas y una fracción de los sólidos suspendidos y sedimentables, entre otras.



**Figura 5.- Fases del tratamiento de aguas convencional.**

Fuente: Creación propia con información de (Galvis & Rivera, 2013).

**1) Tratamiento Preliminar.** Es la fase inicial de todo el proceso de tratamiento, se aplican procesos físicos y mecánicos para retener y separar los materiales de tipo fino y grueso. Se emplean trampas de grasas, conductos enrejados, desarenadores y tamices (Galvis & Rivera, 2013). Estos mecanismos impiden el paso de contaminantes de gran tamaño como botellas, plásticos, basura y arena.

**2) Tratamiento de tipo Primario.** Utiliza procedimientos mecánicos para eliminar objetos suspendidos y DBO, con excepción de compuestos coloidales y/o disueltos. Así se reduce alrededor del 60,0% al 70,0% del material total en suspensión, representando una disminución del 30,0% de la DBO. En esta etapa del proceso se utilizan tanques Imhoff, de sedimentación, flotación y lagunas para la estabilización (Galvis & Rivera, 2013).

Los tratamientos preliminares y primarios también son los responsables de efectuar la remoción hasta del 50,0% de los contaminantes, aunque dicho porcentaje sufre algunas variaciones de acuerdo con las características de importancia y de los métodos empleados en el tratamiento.

**3) Tratamiento de tipo Secundario.** Incluye procedimientos microbiológicos/biológicos para convertir la materia orgánica fina coloidal y disuelta en floc sedimentable, mediante reacciones de tipo bioquímico, eliminando un mínimo de 50,0% hasta un 95,0% con respecto a la DBO (Truu et al., 2009; Ministerio de Desarrollo Económico Dirección de Agua Potable y Saneamiento Básico, 2000). Esta etapa, utiliza metodologías tecnológicas particulares que coadyuvan en la eliminación del material

de origen orgánico y de otros que están presentes como restos provenientes de procedimientos anteriores, alcanzando de esta manera un porcentaje de hasta el 80,0% de eliminación de contaminantes. Generalmente, se emplean los siguientes mecanismos:

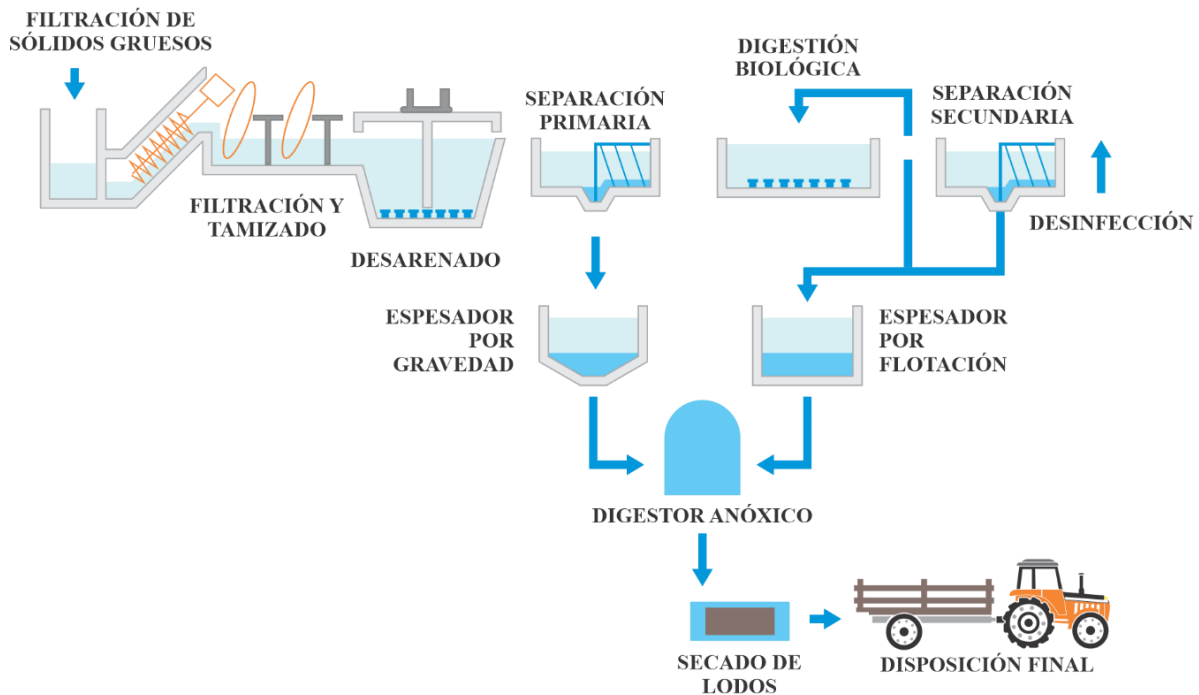
- a) Filtros pre-colados, biofiltros (filtración de tipo biológica) y biodiscos (filtros de tipo rotatorio).
- b) Lodos activados de aireación extendida y de tipo convencional.
- c) Lagunas para la estabilización, de tipo aireada y facultativa.
- d) Reactor anaerobio de flujo ascendente, donde el agua es introducida por el fondo para cruzar a través de un manto de lodos.
- e) Reactor anaerobio de flujo pistón, Permite que la superficie de interfase liquido-gas este en contacto con la atmosfera y tiene un empaquetamiento que evita la compactación de la biomasa.
- f) Lagunas de oxidación, para la remoción de patógenos, nutrientes y metales pesados.

**4) Tratamiento de tipo Terciario.** Elimina compuestos nutritivos como fósforo y nitrógeno, para impedir la eutroficación y/o el desarrollo de algas en las fuentes hídricas de baja circulación como lagunas o lagos. También se evita el consumo excesivo de oxígeno disuelto, favoreciendo el desarrollo adecuado de vida acuática en la fuente hídrica de descarga (Abdullahi et al., 2023). Esta última etapa, alcanza una eliminación de contaminantes aproximada del 100,0%, con referencia a los microorganismos patógenos y las otras características de importancia ambiental.

a) **Cloración.**

b) **Ultravioleta,** consiste en la inducción de cambios foto-bioquímicos con los microorganismos (Ministerio de Desarrollo Económico Dirección de Agua Potable y Saneamiento Básico, 2000).

Como complemento a continuación en la figura 6 se destaca el esquema general asociado con procesos y algunos equipos comúnmente utilizados en los de una planta de tipo convencional:



**Figura 6.- Procedimientos de una planta de tratamiento convencional**

Fuente: adaptación de artículo: Depuración y potabilización del agua. (Doménech, 2003).

En resumen, la finalidad de todos los sistemas de tratamiento es, en primera instancia, realizar la remoción de los materiales que contaminan las aguas, ya sea de carácter nocivo y/o molesto para el ambiente, así como efectuar la modulación cualitativa de las aguas de vertimiento, de



acuerdo con la normatividad legal, para de esta manera proporcionar la promoción y protección a la salud y del bienestar de la comunidad (Llano et al., 2014). Ya que el regreso del agua residual a las fuentes hídricas naturales convierte a la especie humana en consumidores indirectos y directos de estas, mientras que, con el crecimiento poblacional, se incrementan los requerimientos de sistemas para el tratamiento y/o renovación que posibiliten la exposición a los peligros latentes para la salud y para el ambiente (Doménech, 2003). Por ello, con la implementación de los sistemas para el tratamiento del agua residual se suprime la presencia de microorganismos patógenos causantes de enfermedades transmisibles (Men & Fall, 2019).

De este modo, en la selección del tratamiento del agua residual, según se muestra en la tabla 3, se toman en consideración las metas fijadas con la intención de obtener la remoción del material causante de la contaminación (Men & Fall, 2019). Los diferentes sistemas actuales para el tratamiento están conformados por procedimientos de tipo biológico y fisicoquímico o de ambos (Abdullahi et al., 2023).

Los sistemas para el tratamiento mencionados en la tabla 3, se denominan en conformidad con los principios de funcionamiento, como son: películas fijas, lagos anaeróbicos, pozas de oxidación y lodos activados. Mientras que, un sistema para el tratamiento del agua residual aeróbico o anaeróbico, utiliza hasta 4 fases, que involucran los procedimientos arriba mencionados (Castellanos & Monsalve, 2017).

**Tabla 3.- Rendimientos típicos que se logran con las diferentes etapas y procesos de tratamiento,** (Ministerio de Desarrollo Económico Dirección de Agua Potable y Saneamiento Básico, 2000).

Tratamiento	Eficacia en la remoción de constituyentes (%)					
	DBO	DQO	SS	P	N <sub>Org</sub>	Patógenos
<b>Rejillas</b>	desp	Desp	desp	desp	desp	desp
<b>Desarenadores</b>	0,0 – 5,0	0,0 – 5,0	0,0 – 10,0	desp	desp	desp
<b>Sedimentación primaria</b>	30,0 – 40,0	30,0 – 40,0	50,0 – 65,0	10,00 – 20,00	10,00 – 20,00	desp
<b>Lodos activados (Convencional)</b>	80,0 -95,0	80,0 - 95,0	80,0 - 90,0	10,0-25,0	15,0-20,0	desp
<b>Filtros Percoladores</b>						
<b>Alta tasa, roca</b>	65,0 – 80,0	65,0 – 80,0	65,0 – 85,0	8,0 – 12,0	15,0 – 50,0	desp
<b>Super tasa, plástico</b>	65,0 – 85,0	65,0 – 85,0	65,0 – 85,0	8,0 – 12,0	15,0 – 50,0	
<b>Cloración</b>	desp	desp	desp	desp	desp	100
<b>Reactores Anaerobios</b>						
<b>Flujo ascendente</b>	65,0 – 80,0	60,0 – 80,0	60,0 – 70,0	30,0 – 40,0	----	desp
<b>Flujo Pistón</b>	65,0 – 80,0	60,0 – 80,0	60,0 – 70,0	30,0 – 40,0		
<b>Filtros Anaerobios</b>	65,0 – 85,0	60,0 – 80,0	60,0 – 70,0	30,0 – 40,0	----	Desp
<b>Lagunas de Oxidación</b>						
<b>Anaerobia</b>	50,0 – 70,0	----	20,0 – 60,0	----	----	90,0 – 99,9
<b>Aireada</b>	80,0 - 95,0	----	85,0 – 95,0	----	----	90,0 – 99,9
<b>Facultativa</b>	80,0 – 90,0	----	63,0 – 75,0	30,0	----	90,0 – 99,9
<b>De maduración</b>	60,0 – 80,0	----	85,0 – 95,0	----	----	90,0 – 99,9
<b>Ultravioleta</b>	desp	desp	desp	desp	desp	100

desp. Despreciable

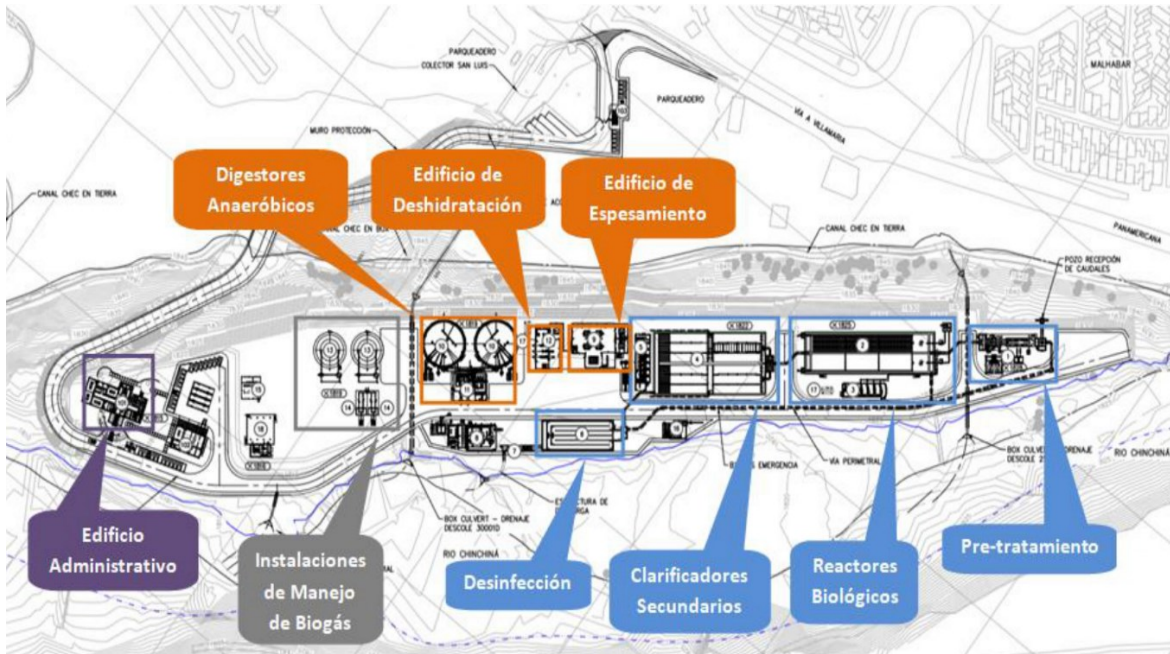
Por otro lado, en Colombia, el Plan de Desarrollo Nacional, y el Programa Nacional de Manejo de Vertidos y de Saneamiento, son dos estrategias encaminadas en estructurar y construir mecanismos integralmente sostenibles para tratar adecuadamente las aguas residuales, de modo que se intervengan las 10 cuencas hidrológicas más contaminadas del país (Plan Nacional de Desarrollo, 2018).

Según esto, en el mes de febrero del año 2019, mediante la firma de la carta de intención, el Estado Nacional confirmó la necesidad de construir un Sistema para tratar el agua residual en la Ciudad de Manizales, y el municipio de Villamaría, cuya finalidad del plan nacional de desarrollo es intervenir las 10 cuencas más contaminadas del país y cuya meta tras la inauguración de dicha planta de tratamiento es disminuir hasta en un 80,0% la concentración de los contaminantes en la cuenca del río Chinchiná (Min. Viviend, 2019), para acelerar el proceso de depuración de la fuente hídrica mencionada, reduciendo los costos posteriores asociados con los tratamientos de potabilización del agua, y estableciendo una factible reutilización de los subproductos generados.

Con base en lo anterior, en seguida se describen detalladamente las particularidades a nivel de infraestructura y diseño que tendrá la planta de tratamiento de agua residual “Los Cábulos” puntualizando las potencialidades de cada fase del proceso.

## Infraestructura y Diseño de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) “Los Cámbulos”

En cuanto a su infraestructura, La PTAR “Los Cambulos” constará de 9 locaciones principales que se distribuyen así (43): 1) Edificios administrativos, 2) Instalaciones de manejo de biogás, 3) Desinfección, 4) Clarificadores secundarios, 5) Reactores biológicos. 6) Pre-tratamientos, 7) Digestores anaeróbicos, 8) Edificio de deshidratación, 9) Edificio de evaporación, como se muestra en la figura 7.



**Figura 7.- Distribución locativa de la Planta de tratamiento de Aguas Residuales “Los Cámbulos” –Fuente: Consorcio Hazen – Conhydra, 2018. (Plano 41102-000 C-169)**

## Características generales y estructurales

Ahora bien, Según el Consorcio Hazen – Conhydra, 2018, quienes construirán el proceso de tratamiento de las aguas residuales se constituye mediante tres líneas principales de procedimientos como la línea de agua, la línea de sólidos y la línea de gas, adicional tendrá un sistema de vertimiento, los cuales se describen detalladamente a continuación:

### Línea de agua

Para el tratamiento de tipo preliminar, esta planta tendrá dos equipos desarenadores de tipo vórtice, cada uno de los cuales podrá procesar un caudal aproximado entre 132 L/s y 523 L/s; dichos desarenadores conseguirían remover los elementos particulados que tengan un diámetro superior o igual a los 0,15 mm, y un período de retención promedio que oscilará en los 20 s y 30 s (Conhydra, 2018). Como el flujo será de tipo no turbulento, se tendrá una disminución potencial del olor.

Para el tratamiento de tipo secundario, se dispondrá de dos tanques, uno para la aireación y el otro para los sedimentos secundarios, que de manera combinada efectuarán los procedimientos que permitirán tanto el desarrollo como la retención de los microorganismos que degradan los constituyentes orgánicos de tipo biodegradable, además de otros elementos de tipo inorgánico, en nuevos productos intermedios y celulares. La fase final del procedimiento es la desinfección, realizada para exterminar los microorganismos patogénicos. Por ello se implementará un mecanismo de inyección de solución de hipoclorito de sodio, formando así el ácido hipocloroso, agente químico formado al aplicar una solución de cloro gaseoso (Conhydra, 2018).

## Línea de sólidos

Para tratar tanto los biosólidos como los lodos, es necesario realizar los procesos de espesamiento, digestión y deshidratación (Conhydra, 2018).

**Espesamiento:** El proceso de espesamiento de los lodos se realizará mediante dos equipos espesadores de banda que funcionan mediante el efecto de la gravedad, en funcionamiento continuo entre 6 h/día hasta 16 h/día, durante los siete días de la semana. Como subproducto de este tratamiento se forma agua que es retirada de los lodos, y recolectada a través de las tuberías para ser enviada a la cabeza del proceso.

**Estabilización:** El procedimiento de estabilización se efectuará mediante digestión bajo condiciones de anaerobiosis, disminuyendo los sólidos de carácter volátil en un porcentaje promedio correspondiente al 35,0%, y con una carga de microorganismos inferior a los 2.000.000 NMP o UFC, por cada gramo de peso seco, con respecto a los coliformes fecales. Este proceso se conectará con la línea de biogás, a través de dos gasómetros para almacenar el biogás producido.

**Deshidratación:** En el procedimiento de deshidratación, se implementarán dos equipos centrifugadores para disminuir hasta una concentración del 22,0% en sólidos totales, la humedad y el volumen del lodo digerido, produciendo así una torta de lodos que se pueda manipular, transportar y disponer de acuerdo con las normas nacionales (Conhydra, 2018).

## **Manejo y disposición de biosólidos**

Un biosólido se define como un producto que es el resultado del proceso de estabilización de la porción del material orgánico de los lodos, producido mediante el tratamiento del agua residual del municipio, y que posee propiedades químicas, físicas y microbiológicas que hacen factible su utilización; lo anterior, de acuerdo con la resolución número 330 del año 2017 por la cual se adopta el Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS) título 7 Definiciones. Asimismo, se determina que dichos biosólidos se generarán de igual manera como un subproducto procedente del tratamiento dado a los lodos en la línea de los sólidos (Conhydra, 2018). Estos tienen importancia porque serán dispuestos para utilizarlos como relleno del municipio en La Esmeralda.

Por otra parte, la Empresa Metropolitana de Aseo S.A (EMAS) que proporciona los servicios públicos de higiene a la ciudad de Manizales, utilizará vehículos clase Ampiroll para efectuar tanto la recolección como el transporte de los biosólidos, realizándolo cuatro veces por día; igualmente, la verificación técnico-mecánica para cumplimentar los requisitos establecidos por la autoridad competente (Conhydra, 2018), así como la certificación de las emisiones de los gases, será efectuada por la misma compañía.

## **Línea del biogás**

En esta planta se tomarán en consideración los espacios necesarios para poder implementar un mecanismo de biogás que permita la generación de energía mediante este subproducto, para que de este modo la planta sea autosuficiente en el tema energético. El biogás es producido a través del proceso de digestión de los lodos, y está conformado esencialmente

por metano y dióxido de carbono, así como por siloxanos y nitrógeno, que se generan mediante el proceso de degradación del material de origen orgánico contenido en los lodos bajo condiciones anaerobias. Se ha calculado que se producirá un caudal de alrededor de 2.556 m<sup>3</sup>/día con condiciones máximas (Conhydra, 2018), este biogás se quemará para impedir la liberación del gas metano hacia la atmósfera, por lo que se instalarán dos gasómetros con capacidad de cada uno con una capacidad de almacenamiento correspondiente a los 1.000 m<sup>3</sup>, teniendo uno en operación y el otro en reserva, con lo que se obtendrán 12 horas de almacenamiento. Asimismo, se contará con dos teas de 250 m<sup>3</sup>/h cada una para incinerar el biogás de exceso.

Como todo el proceso se desarrollará de manera conjunta, a continuación, mediante la tabla 4, se establecen los rendimientos máximos que tendrán estas tres líneas de tratamiento.

**Tabla 4.- Rendimiento de las líneas de tratamiento de la PTAR**

(Conhydra, 2018).

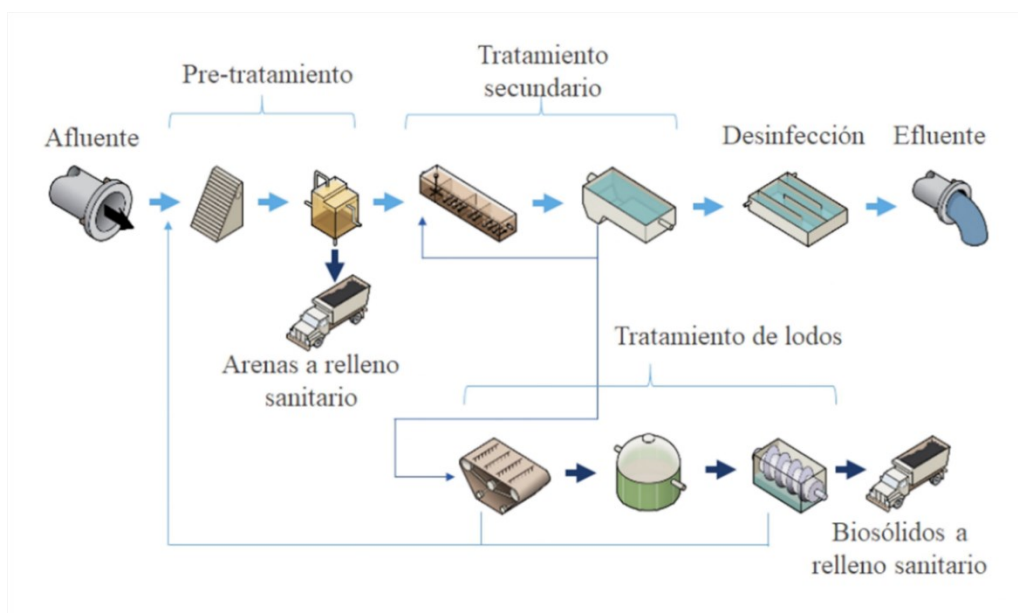
Línea	Rendimiento
<b>Agua</b>	132,0 L/s a 523,0 L/s
<b>Sólidos</b>	22,0% de ST
<b>Biogás</b>	2.556,0 m <sup>3</sup> /día

### Vertimiento

La PTAR Los Cábulos, tendrá un caudal de 0,53 m<sup>3</sup>/s en promedio, y un caudal de 0,995 m<sup>3</sup>/s como máximo, llegando gradualmente en el año de inicio de operación, e



incrementándose hasta el año 2034. De este modo, el sistema para el tratamiento de aguas residuales que se propone para la ciudad de Manizales y el municipio de Villamaría, de acuerdo con la figura 8, estará constituido por dos líneas principales, a saber: 1) tren para el tratamiento del agua residual, y 2) tren para el tratamiento de los lodos que conducen al vertimiento de efluentes tratados que se enviará a las fuentes hídricas y material sólido estabilizado, que será destinado a la generación de biosólidos o enviado al relleno sanitario.



**Figura 8 .- Sistema propuesto de tratamiento para el agua residual.**

Fuente-Consortio Hazen – Conhydra, 2018. (Pág. 45)

Un factor clave en el diseño de las plantas de tratamiento de agua residual es la generación de material orgánico sólido, el cual debe sufrir un proceso transformación que permita convertir los lodos a través de procesos de tratamiento y estabilización en biosólidos, reduciendo su tamaño y permitiendo reutilizarlos de manera segura en otras aplicaciones que minimicen el impacto ambiental generado. El Capítulo IV explica en detalle cada una de las etapas necesarias para comprender mejor la importancia del tratamiento y estabilización de lodos en la gestión integral de las aguas residuales.

## CAPÍTULO IV. Tratamiento y estabilización de lodos

Dentro de los procedimientos más empleados para tratar y/o disponer de los lodos generados por las PTAR, se encuentra la deshidratación, sin embargo, este solamente consigue una reducción del 20,0% del volumen; otra metodología utilizada es la incineración, mediante la cual se reduce el volumen hasta en un 80,0% (Remis Rojas R, 2011). Estos lodos están constituidos por una gran concentración de material orgánico, permitiendo la presencia de microorganismos y otros contaminantes, lo que hace necesario su estabilización. Estos se presentan como líquidos que contienen concentraciones de sólidos entre un 0,5% hasta un 10,0% (Bermeo Barreto, Andrea Melissa e Idrovo Heredia, 2014).

### Características de los lodos

Los contaminantes principales de los lodos son la espuma, la arena, la basura y algunos componentes químicos que se describen en la tabla 5, pero sus características dependen de la edad del agua residual, de su proceso de tratamiento (Galvis & Rivera, 2013), del tratamiento anterior, de la sedimentación, de la densidad de las partículas sólidas, del porcentaje de humedad, de la clase de tecnología utilizada y de la frecuencia de remoción de los lodos (Macías, 2013). Los lodos residuales están compuestos principalmente por humedad, materia orgánica, nutrientes y contaminantes químicos:

**Humedad.** Los lodos resultantes de los procesos de tratamiento de agua residual tienen un alto contenido de agua, que generalmente supera el 70,0% de su composición, lo cual dificulta su manejo y transporte.

**Materia orgánica.** Los lodos residuales también contienen una cantidad significativa de materia orgánica, que proviene de los sólidos suspendidos y la materia orgánica disuelta presente en las aguas residuales (Ayala Garibay, 2020; Lazcano, 2016). Esta materia orgánica puede ser biodegradable y, si no se trata adecuadamente, puede causar problemas ambientales como la liberación de olores desagradables y la demanda de oxígeno en los cuerpos de agua receptores.

**Tabla 5.- Componentes químicos presentes en los lodos** (Macías, 2013b).

Contaminante	Unidades	Lodo primario	Lodo primario digerido	Lodo secundario
Sólidos	%	5,0-9,0	2,0-5,0	0,8-1,2
Sólidos Volátiles	% ST	60,0-80,0	30,0-60,0	59,0-88,0
Proteína	% ST	20,0-30,0	15,0-20,0	32,0-41,0
Nitrógeno	% ST	1,5-4,0	1,6-3,0	2,4-5,0
Fósforo	% ST	0,8-2,8	1,5-4,0	2,8-11,0
Óxido de potasio	% ST	0,0-1,0	0,0-3,0	0,5-0,7
Celulosa	% ST	8,0-15,0	8,0-15,0	---
Hierro	% ST	2,0-4,0	3,0-8,0	---
Óxido de silicio	% ST	15,0-20,0	10,0-20,0	---
pH	Unidades pH	5,0-8,0	6,5-7,5	6,5-8
Alcalinidad	Mg CaCO <sub>2</sub> /L	500,0-1500,0	2500,0-3500,0	580,0-1100,0
Ácidos orgánicos	Mg HAc/L	200,0-2000,0	100,0-600,0	1100,0-1700,0
Contenido energético	KJ ST/Kg	23000,0-29000,0	9000,0-14000,0	19000,0-23000,0

**Nutrientes.** Algunos nutrientes como nitrógeno y el fósforo, que son esenciales para el crecimiento de las plantas pueden estar presente en los lodos provenientes de tratamientos de aguas residuales (Jönsson, 2019). Estos nutrientes pueden ser beneficiosos cuando se aplican en suelos agrícolas como fertilizantes, pero su exceso contribuye de forma

negativa a la eutrofización de cuerpos de agua y causa problemas ambientales graves (McKenna et al., 2023).

**Contaminantes químicos.** Algunos lodos residuales pueden contener una variedad de contaminantes químicos con efectos perjudiciales en la salud humana y el medio ambiente, como metales pesados, compuestos orgánicos persistentes, productos farmacéuticos y productos químicos industriales (Cieślik et al., 2015).

**Patógenos.** Los lodos residuales también albergan microorganismos patógenos, como bacterias, virus y parásitos, que pueden representar graves riesgos para la salud pública si no se eliminan o se reducen a niveles seguros (Drangert & Kjerstadius, 2023; Yang et al., 2022).

En el tratamiento de las aguas residuales, se generan lodos como resultado de las diversas etapas del proceso, como se esquematiza en la figura 9, lo cual produce diferentes tipos de lodos dentro de cada una de las etapas individuales del proceso que cuentan con características particulares.

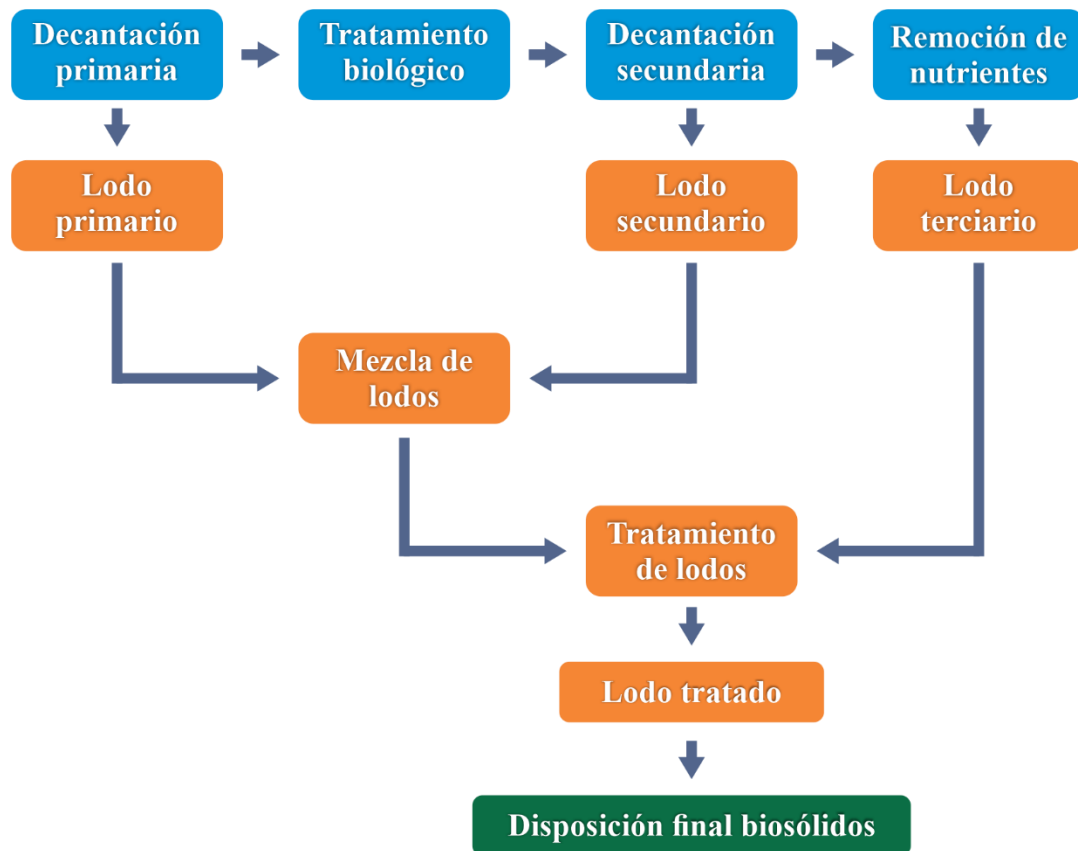
## **Tipos de lodos residuales**

Los lodos residuales, pueden clasificarse según el tipo de tratamiento al que han sido sometidos, a continuación, se presentan algunos de los más comunes, basados en los procesos de tratamiento:

**Lodo crudo.** Este tipo de lodos son los que no se han sometido a ningún proceso de tratamiento ni de estabilización, (Abdelrahman et al., 2023) y es extraído de las PTAR, produciendo tanto la acidificación en los procesos de digestión y en la generación de olores.

**Lodo primario.** Estos proceden del proceso de sedimentación de tipo primaria, en la que son removidos los sólidos de sedimentación, los cuales están constituidos por los sólidos de tipo orgánico e inorgánico, así como por las arenas finas (Gulhan et al., 2023). También contienen en gran concentración, material de origen orgánico y sólidos suspendidos, como papel, frutas y vegetales, entre otros. Asimismo, poseen un carácter fluido y denso, y poseen un porcentaje de agua que oscila entre el 93,0% y el 97,0%, presentan una coloración marrón grisácea, convirtiéndose en sépticos generando fácilmente olores desagradables.

**Lodo activo.** Proviene del tratamiento de tipo biológico, caracterizado por la interacción de diferentes clases de microorganismos. Este se encuentra a manera de floculados que comprenden tanto biomasa como compuestos minerales que se absorben y almacenan. De esta manera, los lodos activados, tienen una gran concentración de microorganismos capaces de convertir una amplia gama de elementos como los fosfatos, el nitrógeno y el oxígeno (Kosar et al., 2023), en compuestos con menor nocividad tanto para el medio ambiente como para la salud poblacional.



**Figura 9.- Tipos de lodo generado según etapas del proceso de tratamiento.**

Fuente: Creación propia con información de (Silva Thomsen et al., 2024).

**Lodo secundario.** Se produce en el tratamiento de tipo secundario biológico, mediante el cual los restos contaminantes se convierten en componentes solubles en la biomasa, además comprenden los materiales particulados remanentes posteriormente al proceso de la sedimentación primaria y que son incorporados a la biomasa (Comisión Nacional del Agua, 2015; Marti & Batista, 2014). Estos lodos presentan una coloración marrón, son ricos en sólidos volátiles, se caracterizan por tener buena deshidratación y tienen la capacidad de producir olores rápidamente, no obstante, dichos olores son igual de intensos que los generados por los lodos producidos en el tratamiento primario (Valderrama Pedraza, 2013).

**Lodo digerido.** Es el resultado de los procesos digestivos de tipo aerobio, poseen una coloración negra, tienen concentraciones relativamente elevadas de biogás, cuando el proceso de digestión se realiza adecuadamente, no genera olores, o un olor muy débil sin llegar a ser desagradable (Abdelrahman et al., 2023). Contiene un porcentaje que oscila entre un 45,0% a 60,0% de material de origen orgánico (Valderrama Pedraza, 2013).

Es importante destacar que, en algunas plantas de tratamiento de aguas residuales, se pueden combinar diferentes procesos de tratamiento, lo que puede dar lugar a lodos mixtos con características combinadas de los tipos mencionados anteriormente (Sánchez J et al., 2019a). Los lodos residuales, también pueden clasificarse de acuerdo con su carga contaminante respecto a metales pesados y microorganismos, enseguida se presentan las categorías más comunes.

## **Clasificación de lodos residuales**

Los lodos residuales se clasifican con base en la cantidad de contaminantes presentes y según su potencial de toxicidad en:

**1. Concentración de metales pesados** (Valderrama Pedraza, 2013). De acuerdo con la Environment Protection Agency (EPA), los niveles de metales pesados que se presentan en la tabla 6, corresponden a metales presentes en lodos, y permiten clasificarlos de acuerdo a su concentración en:

**a) Riesgosos.** Estos lodos presentan una concentración significativa de metales pesados, superando los límites establecidos en las regulaciones ambientales. Su manejo y

disposición requieren de un tratamiento especializado y controlado para evitar la contaminación del suelo y el agua. En algunos casos, pueden requerir un tratamiento adicional para reducir la concentración de metales pesados antes de su disposición final.

**b) No riesgosos.** Estos lodos tienen una concentración insignificante o muy baja de metales pesados, por lo que se consideran no contaminados (Martín-Pozo et al., 2019). Son generados en áreas o procesos donde no hay una presencia significativa de metales pesados y no representan un riesgo ambiental o de salud. Poseen niveles inferiores a los establecidos por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA, 2007b).

**2. Carga microbiológica.** Los lodos residuales se clasifican según la EPA en el contexto de tratamiento y manejo dependiendo su carga microbiológica como lo indica la tabla 7 se agrupan en tipo A y B (Valderrama Pedraza, 2013):

**a) Lodo tipo A.** Los lodos tipo A, también son conocidos como estabilizados, ya que han sido tratados y procesados de forma que se consideran seguros para su manejo y disposición, cumplen con los parámetros de disminución de atracción de vectores (Donado, 2013). No tienen carga detectable de microorganismos patógenos y cumplen con los límites establecidos para la concentración de metales pesados.



**Tabla 6.- Valores permisibles de metales pesados en lodos residuales**  
(Valderrama Pedraza, 2013).

Elemento	mg/Kg (mat. seca)	Tasa de carga acumulativa (Kg/ha)	Concentración para calidad excepcional (mg/Kg)	Tasa de carga anual (Kg/ha/año)
<b>Arsénico (As)</b>	75,0	41,0	41,0	2,0
<b>Cadmio (Cd)</b>	85,0	39,0	39,0	1,9
<b>Cromo (Cr)</b>	--	--	--	--
<b>Plomo (Pb)</b>	4300,0	1500,0	1500,0	75,0
<b>Mercurio (Hg)</b>	57,0	17,0	17,0	0,9
<b>Molibdeno (Mo)</b>	75,0	--	--	--
<b>Níquel (Ni)</b>	420,0	420,0	420,0	21,0

**b) Lodo tipo B.** Los lodos tipo B, son los no estabilizados, no cumplen a cabalidad con los criterios establecidos debido a que poseen cargas detectables de microorganismos patógenos (EPA, 2007b).

Aunque los lodos Tipo B no se consideran tan seguros como los Tipo A, todavía pueden tener aplicaciones controladas dependiendo de sus particularidades en remediación de suelos contaminados, lechos biológicos para el tratamiento de emisiones y vertimientos. Como insumo en la fabricación de materiales de construcción (Bermeo Barreto et al., 2014). En la estabilización de taludes de proyectos viales. En la operación de rellenos sanitarios, en actividades de revegetación, generación energética, entre otros.

**Tabla 7.- Clasificación de lodos según su carga microbiológica**

(Valderrama Pedraza, 2013).

Microorganismo	Lodo tipo A	Lodo tipo B
<b>Coliformes fecales o <i>Salmonella</i></b>	< 1.000 NMP/g o UFC/g	< 2.000.000 NMP/g o UFC/g
<b>Huevos de Helmintos</b>	1 huevo viable/4g	--

Los lodos residuales requieren un proceso de tratamiento y estabilización de la fracción de materia orgánica que permita modificar sus características físicas, químicas microbiológicas y patogénicas en biosólidos con aptitudes para su reutilización como biosólidos en actividades agrícolas, forestales o recuperación de suelos (Gutiérrez Rosero et al., 2014).

## Tratamiento de los lodos

El tratamiento y estabilización de lodos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales es una etapa esencial en el ciclo completo del tratamiento de aguas residuales, para minimizar su impacto ambiental y permitir su manejo adecuado. El proceso de tratamiento y estabilización de lodos implica una serie de técnicas y tecnologías, como la deshidratación, la digestión anaerobia y la desinfección, que permiten reducir el contenido de agua, degradar la materia orgánica y eliminar los patógenos presentes en los lodos. A través de estas etapas, se logra obtener biosólidos estabilizados que pueden ser reutilizados de manera segura. En los siguientes apartados, exteriorizará en detalle cada uno de estos procesos:

**1. Operaciones preliminares.** Previo al espesamiento, los lodos son sometidos a operaciones unitarias de bombeo, homogeneización, desarenado y triturado que permiten su correcto procesamiento.

**2. Espesamiento.** La etapa de Espesamiento se realiza con el objetivo de elevar la concentración de los sólidos por unidad volumétrica, removiendo una porción del líquido y engrosando las partículas (Cárdenas & Molina, 2022), para facilitar su manejo y transporte. Estos lodos se envían a un espesador donde se efectúa el procedimiento por medio de los siguientes métodos (Valderrama Pedraza, 2013):

**a) Por gravedad.** Habitualmente se utiliza en el tratamiento del lodo crudo primario. Se lleva a cabo en un tanque semejante al de sedimentación, en el cual los lodos sufren sedimentación y compactación en el fondo (Guerra Puican, 2020), para posteriormente ser enviados hacia los equipos digestores y de deshidratación.

**b) Por flotación.** Se aplica al lodo activado mediante aire disuelto que se introduce por medio de una solución a alta presión, que oscila entre las 2 atm hasta las 4 atm; de manera subsecuente dicho aire se libera en forma de burbujas que ejercerán presión sobre los lodos, empujándolos hacia la parte superior en donde serán removidos (Saldaña & Castillo, 2021). Con la finalidad de incrementar el volumen de los lodos espesados, se agregan compuestos con acción coagulante como los polielectrolitos, el cloruro férrico y el aluminio.

**c) Por centrifugación.** Se aplica en el secado y espesado de los lodos, comprende el almacenaje de las partículas del lodo mediante la fuerza centrífuga. Posee ciertas ventajas en comparación con el procedimiento anterior (flotación); no obstante, tiene costes más elevados tanto de consumo energético como de inversión (Perez Zuñiga, 2016).

Como resultado del proceso de espesamiento, se alcanza una reducción del volumen de hasta el 80,0%, el cual se lleva a cabo de manera directa dentro del tanque de almacenamiento, lo cual podría beneficiar a otros procedimientos posteriores, como la desinfección y la estabilización, ya que se requeriría la ocupación de un espacio más reducido (Araque Manrique, 2006; Fioravanti et al., 2005).

**3. Estabilización.** El proceso de estabilización corresponde al proceso de oxidación húmeda con cloro o adición de cal y térmico con condiciones de presión y temperatura elevadas, en ella los sólidos orgánicos se descomponen biológicamente en sustancias estables, permitiendo una reducción de los sólidos suspendidos de hasta un 35,0%, reduciendo su capacidad fermentativa, la posible putrefacción, eliminando también los olores fétidos y la carga microbiana patógena (Araque Manrique, 2006; Fioravanti et al., 2005).

La selección del tratamiento para alcanzar la estabilización de los lodos depende de tres factores fundamentales que son la disposición final, calidad y cantidad. Dentro de los

procesos efectuados para estabilizar los lodos, se encuentran (J. G. C. Sánchez et al., 2020):

**a) Biológica.** Este método utiliza procesos biológicos para descomponer la materia orgánica presente en los lodos y reducir la actividad de los microorganismos, se logra mediante el uso de bacterias y otros microorganismos que descomponen la materia orgánica a través de procesos de fermentación y oxidación, para la generación de gas metano y dióxido de carbono (Saldaña & Gámez, 2022). Este proceso de descomposición reduce el contenido de materia orgánica en los lodos y disminuye la producción de olores desagradables. Este tipo de estabilización, a su vez se divide en Anaeróbica y Aeróbica.

➤ **Digestión Anaeróbica.** Es un procedimiento microbiológico, que tiene como objetivo esencial que impedir el desarrollo de reacciones de descomposición subsecuentes al tratamiento, y evitar la generación de resultados indeseables en el vertimiento (Pulgarín Muñoz, 2023). Este proceso se desarrolla en dos etapas, una realizada por microorganismos de tipo saprofitos facultativos, cuyo metabolismo convierte los ácidos volátiles y otra realizada por bacterias de tipo anaeróbicas productoras del gas metano al metabolizar los ácidos volátiles generados en la etapa anterior (J. E. Sánchez et al., 2019b).

➤ **Digestión Aeróbica.** Es un procedimiento extendido de aireación, mantenido por un período de tiempo significativo, aplicado a la mezcla de lodos digeribles, para

permitir el crecimiento de las bacterias aeróbicas. Asimismo, al consumirse todo el sustrato, dichas bacterias empezarán a alimentarse de su protoplasma para seguir satisfaciendo sus recursos energéticos y realizar las reacciones de mantenimiento celular (Trejos & Agudelo, 2012). Por medio de este procedimiento microbiológico, se consigue oxidar entre el 75,0% y el 80,0% de los tejidos celulares, mientras que el restante 20,0% a 25,0% está conformado tanto por elementos inertes no biodegradables como por materiales de tipo orgánico (J. G. C. Sánchez et al., 2020).

**b) Química.** La estabilización química se basa en la adición de agentes químicos para reducir la actividad biológica y estabilizar los lodos. Uno de los métodos comunes es la adición de cal (hidróxido de calcio) (Castillo, et al., 2020) o cal apagada (hidróxido de calcio tratado con agua) a los lodos. La cal eleva el pH de los lodos, lo que inhibe la actividad microbiana y reduce la producción de olores (Alarcón et al., 2020; Saldaña & Gámez, 2022). Además, la cal también puede ayudar a mejorar la estructura y consistencia de los lodos.

**c) Térmica.** La estabilización térmica implica someter los lodos a altas temperaturas para eliminar los microorganismos patógenos y reducir la actividad biológica. Esto se puede lograr mediante procesos como la termofilización o la digestión aeróbica (Candela Levano, 2020). En la termofilización, los lodos se calientan a temperaturas elevadas (generalmente entre 50 °C y 70 °C) durante un período de tiempo específico para eliminar los microorganismos patógenos (Manjarrés et al., 2021), esta digestión,

implica la exposición de los lodos a oxígeno y altas temperaturas para descomponer la materia orgánica (Mansur et al., 2022.).

**4. Deshidratación.** La deshidratación, son operaciones de secado, centrifugado y filtrado, que permiten drenar el agua de los lodos para obtener un biosólido poroso y seco; no obstante, hay que tomar en consideración la cantidad, la biodisposición, la estructura, la regulación, la disponibilidad y el personal requerido para este proceso (Araque Manrique, 2006; Castillo Villanueva, 2017; Miranda, 2019). Existen diferentes métodos de deshidratación disponibles, y la elección del método dependerá de factores como el tipo de lodos, la cantidad de lodos a deshidratar y los recursos disponibles. Algunos métodos utilizados son:

**a) Centrifugación.** En este método, los lodos se someten a fuerzas centrífugas para separar el agua de los sólidos (Rodríguez et al., 2019). La alta velocidad de rotación crea una fuerza centrífuga que empuja los sólidos hacia las paredes del equipo, mientras que el agua es expulsada hacia el centro y se recoge por separado.

**b) Filtro de prensa.** Esta técnica implica la aplicación de presión a los lodos mediante placas filtrantes. Los lodos se bombean en el filtro prensa y se aplica presión para extraer el agua a través de los medios filtrantes, dejando los sólidos atrapados en las placas (Pérez García, 2021).

**c) Por lechos de secado.** Los lodos se extienden en capas delgadas sobre lechos de secado, generalmente hechos de arena o material similar (Alzate Leal, 2021). El agua presente en los lodos se evapora naturalmente debido a la exposición al aire y al sol. A medida que los lodos se secan, se forman costras que se pueden recolectar y transportar posteriormente.

**d) Por tornillos.** Los lodos se pasan a través de un tornillo transportador que ejerce presión sobre los lodos y los empuja contra una placa o pantalla (Castillo Villanueva, 2017). A medida que los lodos se desplazan a lo largo del tornillo, el agua se drena a través de la pantalla y se separa de los sólidos.

**5. Acondicionamiento.** En el proceso de acondicionamiento de lodos se elimina una gran cantidad de líquidos, optimizando la eficacia del secado, con el cual se consigue la aglomeración de las partículas sólidas (Fioravanti et al., 2005; Forero & Trigos, 2020). El objetivo principal de esta operación es incrementar la pérdida de volumen acuoso de los lodos, para mejorar las propiedades físicas y químicas, proporcionando de este modo la eliminación tanto de los materiales más dispersados como de sustancias coloidales, lo que favorece los procesos posteriores de tratamiento y manejo. A continuación, se describen las etapas comunes en el proceso de acondicionamiento de lodos:

**a) Mezcla.** En esta etapa, los lodos se mezclan para homogeneizar su composición y garantizar una distribución uniforme de los componentes (Solís & Carranza, 2022). La mezcla puede realizarse mediante agitación mecánica, sistemas de aireación o bombas que mueven los lodos en los tanques de almacenamiento.



**b) Ajuste de pH.** Dependiendo de la naturaleza de los lodos y el tratamiento deseado, es posible que se requiera el ajuste del pH. Esto se logra mediante la adición de agentes químicos, como ácidos o bases, para alcanzar el rango de pH óptimo para el proceso de tratamiento específico (Gutiérrez Espinoza, 2022; Torrico Garcés, 2022).

**c) Acondicionadores químicos.** Los acondicionadores químicos se agregan a los lodos para mejorar sus propiedades de deshidratación, coagulación y floculación. Estos productos químicos pueden incluir polímeros mejorar la formación de flóculos, y facilitar la separación del agua de los sólidos durante la deshidratación; coagulantes que ayudan a aglomerar partículas finas y coloides presentes en los lodos (Forero & Trigos, 2020.), facilitando su separación (Cárdenas & Molina, 2022); floculantes que promueven la aglomeración de partículas más grandes para formar flóculos sedimentables o agentes espesantes para aumentar la viscosidad de los lodos, lo que facilita su manejo y transporte, dependiendo de las características de los lodos y los objetivos del tratamiento.

**d) Mezcla y reposo.** Después de agregar los acondicionadores químicos, los lodos se mezclan nuevamente para asegurar una distribución uniforme de los productos químicos y se les permite reposar durante un período de tiempo (Castillo et al., 2020), permitiendo que los acondicionadores químicos actúen sobre los lodos y mejoren sus características físicas y químicas.

**6. Secado térmico.** Es un proceso que utiliza calor para eliminar la mayor cantidad de humedad presente en los lodos residuales, convirtiéndolos en un producto seco y sólido

(Espinoza Eche, 2022). Esta técnica de tratamiento de lodos es comúnmente utilizada para reducir el volumen de los lodos, mejorar su manejo y minimizar los costos asociados con su disposición final (Fioravanti et al., 2005). El proceso de secado térmico de los lodos puede ocurrir por:

**a) Preparación de los lodos.** Es el pretratamiento que requieren los lodos antes de ser sometidos a secado térmico, incluye procesos como la deshidratación para reducir el contenido de agua y aumentar la concentración de sólidos en los lodos.

**b) Alimentación del secador.** Los lodos deshidratados se alimentan al secador térmico, los lodos se distribuyen uniformemente en el secador para asegurar un contacto eficiente con la fuente de calor. El tipo de secador depende de la clase de lodos, el volumen a tratar, los recursos disponibles y los requisitos del proceso de secado. Estos pueden ser:

➤ **De tambor.** Un secador de tambor, también conocido como un secador rotatorio, consiste en un tambor giratorio que se calienta internamente, donde los lodos se alimentan en un extremo del tambor y se van secando a medida que se desplazan hacia el otro extremo debido al contacto directo con el tambor caliente (García, 2022). El tambor puede estar equipado con aletas o paletas para mejorar la eficiencia del secado. El vapor de agua se extrae a través de sistemas de ventilación o vacío.

➤ **De lecho fluidizado.** Este tipo de secador utiliza un flujo de aire caliente para suspender los lodos en un lecho de partículas sólidas. A medida que los lodos se

mezclan con el aire caliente, la humedad se evapora y los sólidos se secan (Cantón Pallás, 2022), puede ser de lecho atmosférico o vibratorio, dependiendo del diseño y la aplicación específica.

➤ **De banda.** Los lodos se extienden sobre una banda transportadora que se desplaza a través de una serie de secciones de secado. Las secciones pueden tener diferentes temperaturas y condiciones de aire, lo que permite un secado gradual de los lodos a medida que avanzan a lo largo de la banda (García Baena, 2021). El aire caliente se sopla a través de la banda para facilitar la evaporación del agua.

➤ **De convección forzada.** Utiliza un flujo de aire caliente generado por un ventilador para secar los lodos (García Baena, 2021). Los lodos se dispersan en una cámara o en un lecho y se exponen al aire caliente que pasa a través de ellos (Lapuerta Risueño, 2020). El calor se transfiere por convección, lo que provoca la evaporación del agua y el secado de los lodos.

➤ **Solar.** Los lodos se extienden en capas delgadas en plataformas expuestas a la radiación solar directa. La energía solar calienta los lodos y permite la evaporación del agua. La tecnología solar puede combinarse con otros sistemas de secado para mejorar la eficiencia y acelerar el proceso de secado (Lapuerta Risueño, 2020). Los lodos se distribuyen uniformemente en el secador para asegurar un contacto eficiente con la fuente de calor.

c) **Aplicación de calor.** Se aplica calor al secador térmico para aumentar la temperatura y provocar la evaporación del agua contenida en los lodos con fuentes como gases

calientes, vapor (Lapuerta Risueño, 2020), aceite térmico o incluso energía solar, dependiendo del diseño del secador y los recursos disponibles.

- d) Transferencia de Calor.** El calor se transfiere desde la fuente de calor al interior del secador, calentando los lodos. A medida que los lodos se calientan, el agua presente en ellos se evapora y se convierte en vapor (Cantón Pallás, 2022), reduciendo su peso.
- e) Evaporación del agua.** La evaporación del agua es la etapa clave en el secado térmico de los lodos, debido a que el vapor de agua generado se extrae del secador a través de sistemas de ventilación o de vacío (Miranda, 2019), eliminando el exceso de humedad y manteniendo un ambiente de secado adecuado.
- f) Obtención de lodos secos.** A medida que el proceso de secado continúa, los lodos pierden gradualmente su contenido de humedad. El tiempo requerido para completar el secado dependerá de factores, como la humedad inicial de los lodos, la temperatura y el diseño del secador.
- g) Recolección y disposición de los lodos secos.** Una vez que los lodos han alcanzado un nivel de sequedad adecuado, se recolectan como un producto sólido y seco. Estos lodos secos, con un contenido de humedad significativamente reducido (García, 2022), son más fáciles de manejar, transportar y disponer en comparación con los lodos húmedos.

**7. Desinfección.** El proceso de desinfección es la última fase del tratamiento utilizada en la eliminación de los microorganismos de tipo patogénicos, que basa su importancia en la legislación actual que exige la protección a la salud (Mendoza Sánchez, 2022). Algunos métodos de desinfección son:

- a) Cloración.** La cloración es uno de los métodos de desinfección más utilizados. Se basa en la adición de cloro o compuestos de cloro a los lodos para eliminar los microorganismos patógenos. El cloro puede agregarse en forma de gas (cloro gaseoso), líquido (hipoclorito de sodio) o sólido (pastillas de cloro) (Pacori Pacori, 2021). El cloro reacciona con los microorganismos presentes en los lodos, destruyendo su capacidad de reproducción y causando su muerte.
- b) Ultravioleta.** Este método de desinfección utiliza la radiación UV para inactivar los microorganismos presentes en los lodos. Los lodos se exponen a la radiación UV, que daña el material genético de los microorganismos y los vuelve incapaces de reproducirse, este método no deja residuos químicos (Barranco Herrero, 2023), ni altera significativamente las características físicas o químicas de los lodos tratados.
- c) Ozonización.** La ozonización implica la oxidación de las aguas, a través de la aplicación de un agente oxidante como el ozono ( $O_3$ ) (Calvo et al., 2023; Ikehata et al., 2006) a los lodos para desinfectarlos. El ozono es un potente oxidante que se puede emplea para oxidar los compuestos orgánicos con el objetivo de incrementar su capacidad biodegradable (Ahn et al., 2002; Etienne & Debellefontaine, 2007), disminuyendo o eliminando la coloración, los olores y aportando en la optimización de distintas fases del tratamiento de los lodos residuales (Takedastan et al., 2019). Además, actúa como desinfectante inactivo a los gérmenes que presentan resistencia, como *Mycobacterium*, *Cryptosporidium parvum*, *Giardia*, *Entamoeba histolytica*, *Pseudomonas aureaginosa*, *Legionella* y ciertos virus; a través de la destrucción de su estructura celular y material genético.
- d) Térmica.** En este método, los lodos se someten a altas temperaturas para eliminar los microorganismos patógenos. El calor puede aplicarse mediante tratamiento térmico en

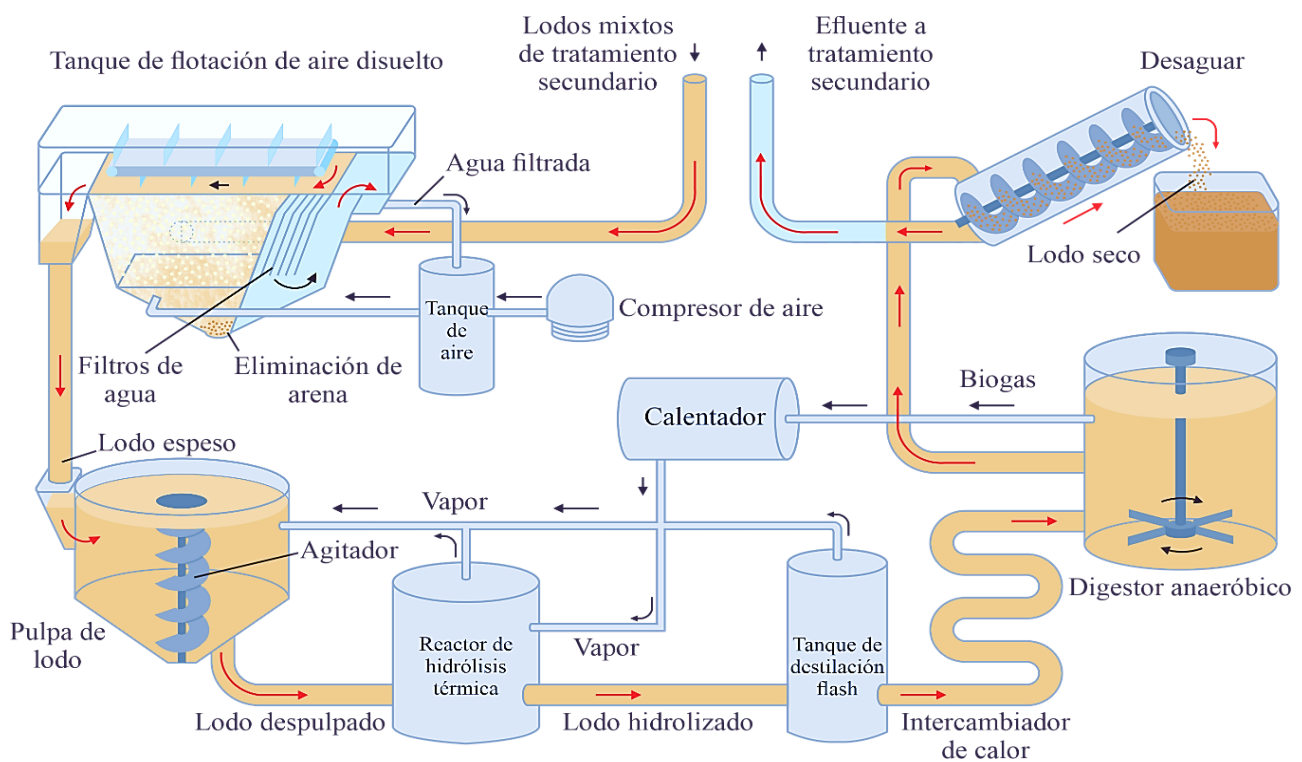
autoclaves o mediante el uso de tecnologías como la pasteurización (Araque Manrique, 2006). La desinfección térmica requiere alcanzar temperaturas lo suficientemente altas para garantizar la destrucción de los microorganismos, mientras se controla cuidadosamente para evitar la degradación excesiva de los lodos.

e) **Química.** Además de la cloración, existen otros desinfectantes químicos que se utilizan en la desinfección de lodos, como el dióxido de cloro (Guerra Puican, 2020), el peróxido de hidrógeno y los compuestos de amonio cuaternario.

f) **Almacenaje con duración prolongada.** Este método se basa en el almacenamiento de los lodos durante un período de tiempo prolongado para permitir que los microorganismos patógenos se desactiven de forma natural debido a factores como la falta de nutrientes, la competencia entre organismos y las condiciones ambientales adversas (Guardado, 2006). Durante el almacenamiento, los lodos se mantienen en recipientes cerrados y protegidos para prevenir la contaminación y la dispersión de patógenos. El período de almacenamiento requerido para lograr una desinfección efectiva puede variar en función de la temperatura, la composición de los lodos y la carga inicial de patógenos.

g) **Pasteurización.** La pasteurización es un método de desinfección que implica calentar los lodos a temperaturas moderadas durante un tiempo determinado para eliminar los microorganismos patógenos, significativamente hasta lograr niveles aceptables desde el punto de vista de la salud pública. El proceso de pasteurización se realiza calentando entre 55 °C y 70 °C, durante un período de tiempo que puede variar de minutos a varias horas. Estas condiciones térmicas son suficientes para inactivar la mayoría de los patógenos presentes en los lodos, incluidas bacterias, virus y parásitos (Guardado, 2006). Después de la pasteurización, los lodos tratados pueden ser utilizados para fines

agrícolas o de otra naturaleza con menor riesgo para la salud. Este método es efectivo para la desinfección de los lodos, ya que proporciona un equilibrio entre la eliminación de los microorganismos patógenos y la preservación de los microorganismos beneficiosos para la degradación de la materia orgánica, no requerir el uso de productos químicos (Fernández de Peñaranda Alejandre, 2023), reduciendo los impactos ambientales asociados con el proceso.



**Figura 10.- Sistema general de tratamiento de lodo residual.**

Fuente: Adaptado de Enciclopedia Britania Inc. (Britannica, n.d.).

Para sintetizar el proceso y dar claridad a la información anterior se presenta en la figura 10 un esquema, en el que se muestra cómo se recibe una mezcla de lodos secundarios y se conducen a través de un tanque de flotación de aire disuelto, donde los sólidos se elevan a la superficie y se eliminan. Posteriormente pasan a la centrifuga de espesamiento y el lodo

espesado se convierte en pulpa con vapor, luego se someten a hidrólisis térmica, donde las moléculas grandes como las proteínas y los lípidos se descomponen bajo calor y presión. El lodo hidrolizado se pasa a través de un tanque de evaporación instantánea, donde una caída repentina de la presión hace que las células exploten, y luego se conducen a una digestión anaeróbica, allí las bacterias convierten la materia orgánica disuelta en biogás que se alimenta a otra etapa del proceso. El lodo digerido se pasa a través de la centrifuga de deshidratación; los sólidos secos se eliminan y el agua se devuelve al tratamiento secundario. Obteniéndose así, el material sólido y seco denominado *biosólidos*.

### **Eficacia de los tratamientos**

La selección del tipo de tratamiento más adecuado se hace tomando en consideración el volumen y la eficacia en la disminución de los parámetros de contaminantes presentes, es por ello por lo que la tabla 8 se ha consignado los diferentes resultados y/o efectos de los distintos procedimientos tecnológicos del tratamiento de los lodos. Para lo cual, recalcando el efecto en la disminución respecto a la concentración de las partículas sólidas por la conversión del dióxido de carbono y del agua, como consecuencia de la mineralización, el proceso de digestión de tipo anaeróbico se considera adecuado y posee la cualidad de producir biogás y dar como resultado lodos adecuados para reúso en procesos agrícolas (Dimas Turmequé, 2022; Guardado, 2006). Por otro lado, el proceso de estabilización alcalina permite incrementar el pH con el objetivo de reducir la cantidad de microorganismos patógenos y de olores desagradables. Pero, en el caso de los procesos de deshidratación y de acondicionamiento, estos son más útiles para aglomerar el contenido de las partículas sólidas



y en consecuencia facilitar su manipulación, cuando se realizan de manera posterior a los procesos de compostaje y calentamiento, pues estos disminuyen las actividades biológicas.

**Tabla 8.- Resultados de los tratamientos de los lodos residuales**

(Torres et al., 2010).

Tratamiento	Procedimiento	Resultado
<b>Sedimentación</b>	Separación de sólidos y agua por gravedad, centrifugado o flotación.	Concentración de partículas sólidas.
<b>Digestión</b>	Estabilización biológica, transformación del material biológico en CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O y CH <sub>4</sub> .	Reducción de actividad microbiana.
<b>Estabilización alcalina</b>	Estabilización, adición de sustancias alcalinas (cal).	Reducción de actividades biológicas.
<b>Acondicionamiento</b>	Coagulación de partículas sólidas para la deshidratación.	Aglomeración de las partículas sólidas.
<b>Deshidratación</b>	Separación de sólidos del agua.	Manipulación de los lodos.
<b>Compostaje</b>	Estabilización biológica, tipo aeróbica y térmica.	Reducción de actividades biológicas.
<b>Calentamiento</b>	Eliminación de microorganismos patógenos y humedad residual.	Desinfección y destrucción de microorganismos.

### 1. Tratamiento por Ozonificación.

En una investigación que evaluó a cuatro clases de lodos sometidos a tratamiento por ozonización, se observó que la DQO fue proporcional con la concentración transferida de ozono. En este sentido, la disolución de ozono fue similar en los diferentes lodos analizados (Etienne & Debellefontaine, 2007). Además, este proceso de ozonización

se puede aplicar cuando se tratan lodos líquidos provenientes de los equipos sedimentadores previo a la digestión. Asimismo, también es un método aplicable a los lodos procedentes de tratamientos de tipo biológico (Amador-Díaz et al., 2015; Etienne & Debellefontaine, 2007; Saktaywin et al., 2006). A la hora de reducir el volumen de los lodos, se toman en consideración parámetros como la cantidad del material susceptible a oxidación, el tipo de lodo, así como la cantidad de ozono, la ausencia y/o presencia de sustancias orgánicas biodegradables y la eficacia del mecanismo de transferencia de estado gas a líquido del ozono (J. Wang et al., 2020).

### **Resultados del proceso de ozonización**

Con algunas investigaciones efectuadas en los procedimientos de sedimentación-floculación-coagulación en el tratamiento de las aguas de origen residual (Lorenzo et al., 2009), se comprobó la eficacia del proceso de ozonificación, tal como se describe en la tabla 9. Posteriormente al proceso de la sedimentación, se alcanzó un promedio de 24 mL de lodo por cada litro de agua. Se observó que, en promedio, los valores de la disminución de los parámetros correspondientes a DQO, coloración y turbidez oscilaban entre el 62,0% y el 86,0%, en contraste con la cantidad de fósforo total, que disminuyó entre un 30,0% y un 52,0%, mientras que el nitrógeno total se redujo entre un 39,0% y un 65,0%. Con estos resultados, quedó disponible cierta cantidad de sustancias nutritivas para verterlas en los suelos.

Con respecto a la concentración de los coliformes fecales, esta alcanzó valores de inactivación de hasta un 99,9,0% de eficacia. Por su parte, la disminución en la cantidad

de partículas sólidas correspondió desde un 30,0% hasta un 95,0%. Otras investigaciones similares informaron que, con el proceso de la ozonización, se pueden eliminar los sólidos hasta en un 80,0% (Amador-Díaz et al., 2015).

Asimismo, con una dosis de 2,6 g/L de ozono por un período de una hora, se alcanza una disminución eficiente del material orgánico, teniendo en consideración los porcentajes reducidos de 43,3% de SDV y de 64,6% de DQO, presentados en la tabla 9. La mineralización de compuestos de origen orgánico permite una conversión del material en dióxido de carbono, nitrógeno libre y oxígeno entre el 60% y el 70% de este material es convertido. Si bien, con la reducción de la DQO se comprueba la estabilización, con el proceso de ozonización, se consigue una disminución que oscila entre el 30,0% y el 70,0% de los lodos de origen residual (Amador-Díaz et al., 2015). De este modo, la reducción del volumen de los lodos se observó mediante la disminución en la concentración de las partículas sólidas sedimentables, que fue del 90,5%, y que correspondió a una reducción de 845 mL/L, con la dosis mínima de ozono aplicada.

Además, en esta investigación, los metales como el mercurio, níquel, cobre, arsénico, plomo, cadmio y zinc, que tienen una alta toxicidad, se valoraron en concentraciones que son inocuas para la salud pública. Por consiguiente, las investigaciones indican que el proceso de ozonización reduce la presencia de metales totales y disueltos en porcentajes que van desde un  $84,0\% \pm 7,0\%$  y un  $84,0\% \pm 17,0\%$ , de manera respectiva (Lage Filho et al., 2011).

**Tabla 9.- Eficiencia de la ozonización a diferentes dosis**  
(Amador-Díaz et al., 2015; J. Wang et al., 2020).

Parámetro	Dosis de ozono (g/L)			
	2,6	4,0	5,3	8,0
<b>DQO</b>	64,6	69,3	62,5	70,5
<b>Turbidez</b>	72,1	77,5	69,4	78,2
<b>Color</b>	78,9	85,0	76,0	85,7
<b>C. fecales</b>	99,9	99,9	99,9	99,9
<b>Fósforo total</b>	31,5	44,2	36,3	51,3
<b>Nitrógeno total</b>	39,4	61,1	58,1	65,6
<b>ST</b>	48,9	70,0	55,4	68,1
<b>STF</b>	66,6	73,0	59,4	70,5
<b>STV</b>	58,1	68,7	53,8	67,2
<b>SST</b>	66,0	75,8	63,7	77,5
<b>SSF</b>	68,4	79,5	63,0	76,0
<b>SSV</b>	65,2	74,5	64,0	78,0
<b>SDT</b>	50,3	58,7	39,5	50,6
<b>SDF</b>	64,3	63,2	54,2	62,5
<b>SDV</b>	43,3	56,5	32,1	44,5
<b>SS</b>	90,5	93,2	90,4	94,3

**2. Estabilización de lodos.** Los procesos de estabilización de tipo anaerobio permiten la remoción aproximada entre el 40,0% y el 60,0% de la carga de materia orgánica, reduce la masa de lodo entre un 25,0% y un 45,0%, generando un efecto positivo en la reducción de costos asociados a la disposición final del mismo (Muñoz et al., 2019), produce un lodo final rico en nutrientes, elimina entre el 70,0% y el 90,0% de los olores desagradables y reduce entre un 0,5 – 4,0 veces la carga de patógenos de tipo coliformes.

Por su parte la estabilización aeróbica puede llevarse a cabo de forma simultánea en plantas de lodos activados, donde tanto los lodos primarios como los secundarios se airean continuamente durante largos períodos de tiempo (Araque Manrique, 2006). La estabilidad química del lodo es oxidativa genera como resultado una reducción del 30,0 % al 35,0 % en los sólidos en suspensión al tiempo que reduce los patógenos y los malos olores están presentes (Trejos & Agudelo, 2012).

**3. Lodos activados.** Los lodos residuales, pueden tratarse por el proceso lodos activados, por medio de la utilización de una masa de microorganismos suspendidos que entran en contacto profundo con el agua a tratar. A la mezcla conformada por las aguas a tratar y los lodos, se le denomina licor mixto (Siatou et al., 2020). En este se forman floculados biológicos que sufren sedimentación en un tanque para este propósito, del cual se disponen a recirculación hacia el tanque de aireación (Muñoz et al., 2019). Este sistema posee ventajas sobre los otros sistemas de tratamiento, debido a que:

- a) Requiere cortos períodos para la estabilización
- b) Tiene mayor eficiencia en la eliminación de material contaminante medido en términos de DQO.
- c) No se necesita un área extensa para su construcción.
- d) Tienen mayor facilidad de manejo anaerobio.
- e) No produce olores descompuestos.
- f) Produce bajas cantidades de amoníaco, sólidos suspendidos y DBO.
- g) Minimiza las concentraciones de aceites y grasas.
- h) Minimiza grandemente la presencia de microorganismos patógenos.

- i) Por ello, es necesario someter a los lodos a estabilización, de acuerdo con sus características particulares.

## Microorganismos utilizados en los lodos

Diferentes tipos de microorganismos se emplean para disminuir la concentración de material orgánico presente durante el tratamiento de tipo secundario (Donado H, 2013), de modo que las bacterias son las más representativas, existiendo más de 300 especies.

**1. Bacterias.** Las bacterias presentes en los lodos más importantes son: *Zooglea*, *Pseudomona spp*, *Flavobacterium*, *Alcaligenes sp*, *Bacillus spp*, *Achromobacter spp*, *Corynebacterium spp*, *Comomonas spp*, *Brevibacterium spp*, *Acinetobacter spp*, que se encargan de metabolizar los compuestos conformados por hidrocarburos, ácidos grasos, parafinas, alcoholes y una diversidad de material orgánico (Díaz Gonzáles, 2021).

También se encuentran las bacterias nitrificantes, que son las responsables de llevar a cabo la oxidación de los compuestos nitrogenados presentes, como: *Nitrobacter* y *Nitrosomonas* (Granja Ruales, 2021); por su parte, las bacterias sulfurosas encargadas de realizar la oxidación de los compuestos azufrados, como es: *Rhodospirillaceae* (Díaz et al., 2022); además, los microorganismos filamentosos son los responsables de efectuar la oxidación de los compuestos del carbono, entre los que destacan: *Sphaerotilus* y *Beggiatoa*. En un lodo de clase B el conteo total de bacterias las unidades formadoras de colonias deben corresponder un número menor o igual a  $10^6$  UFC/mg de lodo.(EPA, 2007b)

- 2. Hongos.** En condiciones de pH bajo, con déficit de nitrógeno y ambiente con toxicidad, se desarrollan algunos hongos, como lo son: *Geotrichum*, *Penicillium*, *Cephalosporium*, *Cladosporium* y *Alternaria* (Toro & Goya, 2023), que poseen la capacidad de hidrolizar lípidos, celulosa y proteínas.
- 3. Protozoarios.** En el caso de los protozoarios, que son los responsables de la regulación y depuración de la biomasa microbiana, optimizando la calidad de los efluentes, el grupo más importante es el de los Ciliados, a su vez, entre los Ciliados libres se encuentran los géneros (Alfaro Arrieta, 2016): *Chilodonella sp*, *Colpidium sp*, *Blephariama*, *Euplotes sp*, *Paramecium sp*, *Leonotos spp*, *Trachelophylum sp* y *Spirostomum sp*. En el género de los Ciliados trepadores están: *Aspidisca sp* y *Euplotes sp*. Por la parte de los Ciliados anclados, están: *Vorticella sp*, *Corchesium sp*, *Opercularia sp* y *Epystilis sp*. Con referencia a los protozoarios flagelados se encuentran: *Bodo sp*, *Pleuromonas* y *Monosiga*. Respecto a los protozoarios Rhizopoda o Amiboidea, están: *Amoeba spp* y *Thecamoeba spp* (González et al., 2023).
- 4. Organismos multicelulares.** De igual manera se encuentran organismos multicelulares con tamaño, entre las 100 micras y las 500 micras (González et al., 2023), llamados Rotíferos, siendo los principales: *Bdeloidea: Philodina sp* y *Habrotocha*; *Monogononta: Lecane sp* y *Notomata sp*, y cuya función es la de eliminar posibles bacterias patógenas (Blaz Ríos, 2019).

La finalidad de los tratamientos dados a los lodos tiene como objetivo alcanzar su estabilización, garantizando la adecuada descomposición del material orgánico presente en estos, con la consecuente eliminación de los olores desagradables, la disminución del volumen y la inactivación de los microorganismos con actividad patógena, lo que hará factible su utilización o biodisposición final acorde a la normatividad vigente de cada país.

### **Normas para biosólidos y lodos de origen residual a nivel mundial**

La regulación a nivel mundial de estos compuestos para su aprovechamiento y disposición final depende de distintos aspectos fisicoquímicos y microbiológicos. En España, se consideran los valores límites en función del pH de los suelos (Presidencia, 2009). En los Estados Unidos de América, se calculan las tasas límites considerando la concentración en nutrientes de los biosólidos, así como las necesidades de la agricultura. No obstante, todas y cada una de las normatividades se reglamentan a partir de la conversión precedente al biosólido (Environmental Protection Agency & (EPA), 1999). Este país norteamericano en el título 40 del código de reglamentos federales en la parte 503; aborda la misión de la Agencia de protección ambiental desarrolla un reglamento que contiene directrices para el uso o eliminación de lodos de depuradora, para proteger la salud humana y el medio ambiente de cualquier daño razonable o efectos adversos de los contaminantes tóxicos en los lodos de depuradora (United States Environmental Protection Agency, 1995).

Los biosólidos se definen en esta norma como residuos sólidos, semisólidos o líquidos generados durante el tratamiento de aguas servidas domiciliarias, incluyen los sólidos removidos durante el tratamiento primario, secundario o avanzado del proceso de tratamiento



de aguas servidas y cualquier material derivado de los lodos, excepto las gravillas o cenizas generadas durante el proceso de incineración” (United States Environmental Protection Agency, 1995).

Por su parte, en México, la NOM-004-SEMARNAT-2002, conceptualiza a los biosólidos como “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” (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales., 2002).

En países de Sur América como Argentina la ley N° 24051, mediante la cual el ministerio de desarrollo social y medio ambiente aprueba la resolución 97 de 2001 “Reglamento para el manejo sustentable de barros generados en plantas de tratamiento de efluentes líquidos”; esta resolución contempla las definiciones, muestreo, caracterización y categorización de los barros, tipología de los barros, formas de uso, disposición final, limitaciones y control de calidad para dichos biosólidos. (Ministerio de Desarrollo Social y Medio Ambiente, 2001).

Otros países como Chile aprueba en la Ley N° 19300 de 1994 las bases generales del medio ambiente y posteriormente, bajo el decreto supremo N° 004 de 2009 establece el reglamento para el manejo de lodos generados en plantas de aguas servidas, en el cual se contemplan las disposiciones generales y definiciones, la clasificación, el manejo sanitario, la aplicación, los procedimientos de medición y control de lodos (Ministerio secretario general de la presidencia; subsecretaría general de la presidencia, 2009).

Por ello, en la tabla 10 se presentan datos comparativos en cuanto a los valores límite que se permiten con referencia a metales pesados en Chile y los Estados Unidos de América (Environmental Protection Agency & (EPA), 1999; Presidencia, 2009).

**Tabla 10.- Límites permisibles de metales pesados en lodos**  
(Environmental Protection Agency & (EPA), 1999; Presidencia, 2009).

Metal	Chile		Estados Unidos de América (EPA)		
	Suelo forestal y frutal (mg/kg MS)	Suelos degradados (mg/kg MS)	Concentración (mg/kg MS)	Tasa anual (kg/ha-año)	Carga acumulada (kg/ha)
As	20	40	75	2	41
Cd	8	40	85	1,9	39
Cu	1000	1200	4300	75	1500
Hg	10	20	840	15	300
Ni	80	420	75	0,9	18
Pb	300	400	420	21	420
Se	50	100	100	5	100
Zn	2000	2800	7500	140	2800
Cr	n.d.	n.d.	3000	150	3000
Mo	n.d.	n.d.	57	0,85	17

De acuerdo con las normas antes descritas, especialmente la generada por la EPA, los biosólidos se pueden clasificar en buenos y excelentes, dependiendo de la cantidad de metales pesados presentes, mostrados en la tabla 11, y también en los tipos A, B y C, como se puede observar en la tabla 12, dependiendo de su carga microbiológica patógena y parasitaria (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales., 2002), (United States Environmental Protection Agency, 1995).

**Tabla 11.- Valores límite permisibles de metales pesados en biosólidos**

(Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales., 2002).

Contaminante	Biosólidos (mg/kg base seca)	
	Buenos	Excelentes
As	75,0	41,0
Cd	85,0	39,0
Cr	3000,0	1200,0
Cu	4300,0	1500,0
Pb	840,0	300,0
Hg	57,0	17,0
Ni	420,0	420,0
Zn	7500,0	2800,0

**Tabla 12.- Valores límite de microorganismos patógenos y parásitos**

(Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales., 2002), (United States Environmental Protection Agency, 1995).

Tipo	Indicador bacteriológico	Microorganismo patógeno	Parásito
	Coliformes fecales (NMP/g BS)	<i>Salmonella spp</i> (NMP/g BS)	Huevecillos de Helminos por gramo BS
A	< 1.000,0	< 3,0	< 1,0
B	< 1.000,0	< 3,0	< 10,0
C	< 2.000.000,0	< 300,0	< 35,0

Asimismo, los biosólidos se clasifican como buenos y excelentes dependiendo de si corresponde al tipo A, B y C, en conformidad con la tabla 13, pueden considerarse aprovechables para diferentes actividades, si presentan un contenido de humedad correspondiente de hasta el 85,0% (Castañeda & López, 2012; Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales., 2002).

**Tabla 13.- Tipos de usos de los biosólidos**

(Castañeda & López, 2012; United States Environmental Protection Agency, 1995).

Biosólido	Tipo	Aprovechamiento
Bueno o Excelente	C	1) Forestal 2) Mejoramiento del suelo 3) Agrícola
Excelente – Bueno	B	1) Urbano sin contacto público al aplicar 2) Mismos que el tipo C
Excelente	A	1) Urbano con contacto público al aplicar 2) Mismos que tipos B y C

### Aspectos normativos nacionales

Con referencia a las normas legales colombianas, estas indican que la gestión de los lodos de origen residual se debe de realizar respetando la autonomía de los municipios, así como su identidad y cultura, debe ser transversal, participativa e integral, para obtener armoniosidad en todos los aspectos, locales, regionales, departamentales y nacionales (Ministerio del Medio Ambiente, 2002; Ospina López et al., 2017). De acuerdo con lo anterior, la ley número 99 del año 1993 y la ley número 136 del año 1994, determinan la asignación de las actividades con respecto a materia del campo ambiental a las corporaciones regionales autónomas, al municipio, los departamentos, las regiones urbanas y zonas indígenas.

Para certificar que la planeación sea integral a través del Estado, del control y aprovechamiento de los recursos no renovables que garanticen el desarrollo sustentable, la conservación, sustitución y/o rehabilitación, de acuerdo con el artículo número 80

constitucional, la planificación del medio ambiente de los territorios está sujeta a la armonización. Para alcanzar lo anteriormente expuesto por la constitución nacional, los distritos, municipios y departamentos deben de ser capaces de diseñar y planificar mecanismos y programas que permitan aprovechar plenamente los recursos renovables naturales (Ministerio del Medio Ambiente, 2002), con el asesoramiento y dirección de las corporaciones regionales autónomas de acuerdo con sus jurisdicciones.

Asimismo, en el numeral nueve del artículo número 313 de la constitución política: cada concejo municipal dictaminará la normatividad requerida para controlar, preservar y defender el patrimonio municipal cultural y ecológico, estableciendo normativas y estatutos de planeación medioambiental, que cumplimenten las disposiciones de carácter legal. De este modo, la normatividad que rige dicha gestión o administración medioambiental del municipio se puede resumir en la tabla 16.

Así, de conformidad con las normas colombianas, los actores que tienen participación en la gestión ambiental del municipio son (Ministerio del Medio Ambiente, 2002):

- 1) La alcaldía municipal, que es quien lidera los procesos de la GAM.
- 2) Los funcionarios institucionales de la administración regional y local.
- 3) Los actores de la economía, como los gremios, industrias y empresarios.
- 4) Los personajes de la sociedad, representados por la sociedad, los comuneros, los ediles, organizaciones no gubernamentales, los académicos y las asociaciones.

La Ley 142 de 1994 por la cual en el artículo 14, numeral 14.23 establece el régimen de los servicios públicos domiciliarios de alcantarillado y se dictan otras disposiciones para actividades complementarias de transporte, tratamiento y disposición final de residuos en Colombia (Congreso Colombiano, 1994), consecutivamente el decreto 1287 de 2014 establece los “Criterios para el uso de biosólidos generados en plantas de tratamiento de agua residual municipales”, incluye caracterización, formas de uso, restricciones y control de calidad. (Ministerio de Vivienda, 2014).

**Tabla 14.- Normas de Gestión Ambiental Municipal**  
(Ospina López et al., 2017).

<b>Norma</b>	<b>Ley, artículo y/o plan</b>
<b>Determinantes constitucionales CPN 1991</b>	Artículos número: 8, 49, 58, 97, 79, 80, 95, 267, 277, 286, 287, 289, 300, 302, 313, 317, 330, 332, 333, 334, 339 y 340
<b>Normas de carácter legal</b>	Ley 99/93: Artículos número: 31, 64, 65, 66, 67 Ley 136/94
<b>Normas reglamentarias</b>	Ley 388/97 de desarrollo territorial Planes de ordenamiento territorial Planes de desarrollo municipal Planes de gestión de las CAR

## **Aprovechamiento de los lodos de origen residual**

En la gran mayoría de las instalaciones para el tratamiento de las aguas de origen residual tanto del municipio como de las industrias que operan en América Latina, no se toma en consideración ni el manejo ni la disposición de los lodos provenientes de las aguas residuales, por lo que se dispone de ellos únicamente como rellenos sanitarios (Noguera & Olivero,

2010), lo cual genera mucha contaminación en el medio ambiente, ocasionada por la elevada carga microbiológica patógena, de metales pesados y de compuestos tóxicos de tipo orgánico (Ministerio del Medio Ambiente, 2002). No obstante, Norma Oropeza García en su artículo titulado “Lodos residuales: estabilización y manejo”, pone de manifiesto que los lodos residuales se pueden reutilizar sin presentar riesgo alguno para la salud pública y para el medio ambiente en las áreas de uso agrícola posteriormente a su tratamiento con diferentes procedimientos para estabilizarlos (Oropeza García, 2006), pues con este tipo de reutilización el rendimiento aumenta desde un 10,0% hasta un 85,0% en el caso de los cultivos en comparación con los fertilizantes.

Asimismo, en el estudio de “Vulnerabilidad de acuíferos frente al uso de aguas residuales y lodos de agricultura” desarrollado por Esteller, en el cual se pretendía establecer la vulnerabilidad de las fuentes hídricas naturales frente a la utilización de los lodos y el agua de origen residual en las actividades agrícolas, determinó que se deben de tomar en consideración las propiedades de los lodos residuales (Esteller, 2002), así como los factores ambientales y sanitarios, y de igual manera los parámetros empleados en la determinación de la calidad de los lodos de uso agrícola, los cuales se fundamentan de manera principal, en los valores de los sólidos volátiles suspendidos, humedad relativa, carbono total orgánico, nitratos, nitrógeno total, fósforo, magnesio, calcio y potasio, así como de los metales pesados cadmio, plomo y zinc, entre otros, y también de los microorganismos patógenos, como los Coliformes fecales y totales y las bacterias, y de manera importante, el pH.

Igualmente se explica que, si los lodos de origen residual se emplean de manera controlada en las actividades agrícolas, pueden impedirse bastantes complicaciones en su uso, tal como

pueden ser los procesos de lixiviación de los contaminantes contenidos en dichos lodos residuales (García & Ponce, 2021). Por otra parte, se debe tener en claro que con el término lodos, se hace referencia a los residuos con un elevado contenido de humedad, que sobrepasa inclusive el 95,0% de su composición. Mientras que los biosólidos son aquellos residuos de carácter orgánico que se obtienen posteriormente a someter las aguas residuales a tratamiento para eliminar la carga microbiana presente.

Según el decreto 1287 de 2014, por el cual se establecieron los criterios para el uso de los biosólidos generados en plantas de tratamientos de aguas residuales municipales (Ministerio de Vivienda, 2014), dependiendo sus características patogénicas como:

- **Categoría C:** Son biosólidos que no cumplen con ningún parámetro
- **Categoría B:** Son biosólidos que han sido tratados logrando reducir la concentración de patógenos a niveles aceptables para uso beneficioso, pero se requieren medidas por las restricciones sanitarias
- **Categoría A:** Biosólidos considerados de calidad excepcional, estos han sido tratados logrando reducir la concentración de patógenos a niveles tan bajos que no se requieren restricciones adicionales.

Estas categorías determinan su campo de acción en cuanto a aprovechamiento en actividades agrícolas y no agrícolas, como recuperadores de suelos, actividades forestales y cobertura de rellenos sanitarios, dependiendo de sus características fisicoquímicas.



## Usos alternativos de biosólidos

Debido a su elevado valor nutrimental, los biosólidos se pueden utilizar en la jardinería y la agricultura regulado según criterios establecidos por la NTC 5167, ya que su concentración de micro y macronutrientes, estimulan el desarrollo de los cultivos y las plantas. En los Estados Unidos de América un porcentaje superior al 50,0% de los biosólidos generados son reutilizados como acondicionador de suelo (Environmental Protection Agency & (EPA), 1999), con la finalidad de conservar su facultad de producción y porque promueve el crecimiento de la flora. Además, debido al elevado valor calorífico, los biosólidos se han convertido en una fuente importante en el desarrollo de procesos de combustión con recuperación de energía.

En este sentido, los usos alternativos principales que se les está dando a los biosólidos son: en jardinería y paisajismo, reducción de espacios en vertederos, para la fertilización de cultivos forestales, como acondicionador de suelo, para prevenir la erosión del suelo, como fertilizante agrícola y como composta (Castañeda & López , 2012b; Marín Bahamón, 2019). Ahora bien, dentro de los beneficios que se obtienen están: la devolución de material orgánico a los suelos, la disminución de los biosólidos como relleno sanitario y la promoción del desarrollo de nuevas perspectivas de valor añadido (Macías, 2013b).

Si bien, derivado de la imposibilidad de hacer una valoración de más alternativas de uso, ya sea por su baja relevancia o sencillamente por no tener una factibilidad adecuada de implementación, hay que considerar también opciones como la fitoestabilización de tranques de relaves, y la recuperación de canteras y pasivos de minería y suelos en degradación (Edo-

Alcón et al., 2019). En el capítulo V se explican diferentes técnicas y estrategias de reutilización de los biosólidos, que permiten desarrollar una economía más sostenible para los sistemas de tratamiento.

## Capítulo V. Técnicas de reutilización de biosólidos

El uso del agua de origen residual bien podría resultar en fuentes innovadoras de ingresos económicos en la administración de los sistemas de tratamiento, particularmente bajo las condiciones en las que la escasez de este recurso natural no renovable es aguda o recurrente composita (Castañeda & López, 2012b; Marín Bahamón, 2019). Por esto, se han implementado distintos mecanismos financieros de economía circular (Cortés García, 2020), mediante los que se pretende recuperar tanto el valor como los costos de producción, pues la operación de las PTAR parece estar en una desventaja económica.

No obstante, los ingresos en sentido económico generados mediante la venta del agua tratada no son suficientes *per se* para solventar todos los gastos de mantenimiento y operación de las PTAR (Gutiérrez & Stevanato, 2021). De modo que, mediante la producción energética y de nutrimentos, en especial de los compuestos nitrogenados y fosforados, podrían convertirse en fuentes innovadoras de ingresos financieros que permitan a dichas plantas de tratamiento ser autosuficientes (Muscarella et al., 2023a). Sin embargo, la disposición final de los lodos genera dificultades tecnológicas, económicas y ambientales. Aunque, si se disponen correctamente, se pueden obtener grandes beneficios. Por ello, las opciones que con mayor frecuencia se utilizan para el aprovechamiento de los lodos son (Tejeda Benítez & Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental, 2008):

**1. Energético.** La energía generada en los procesos de tratamiento de agua y lodos residuales se puede utilizar en la industria eléctrica, de refrigeración y calefacción, ya que



actualmente se cuenta con tecnología que posibilita recuperar energía *in situ* a través de los mecanismos empleados en el tratamiento de los biosólidos, los cuales se encuentran complementados en las PTAR (Cabrales Tello, 2019). Lo anterior, permitirá que dichas plantas sean autosuficientes, puesto que pasarían a ser generadoras energéticas en vez de consumidoras. Otro beneficio de convertir las PTAR en económicamente autosuficientes, es la reducción de la huella de carbono característica (Solano et al., 2023), incrementando los ingresos a través de créditos de carbono y mediante la elaboración de planes de comercialización de las emisiones del carbono.

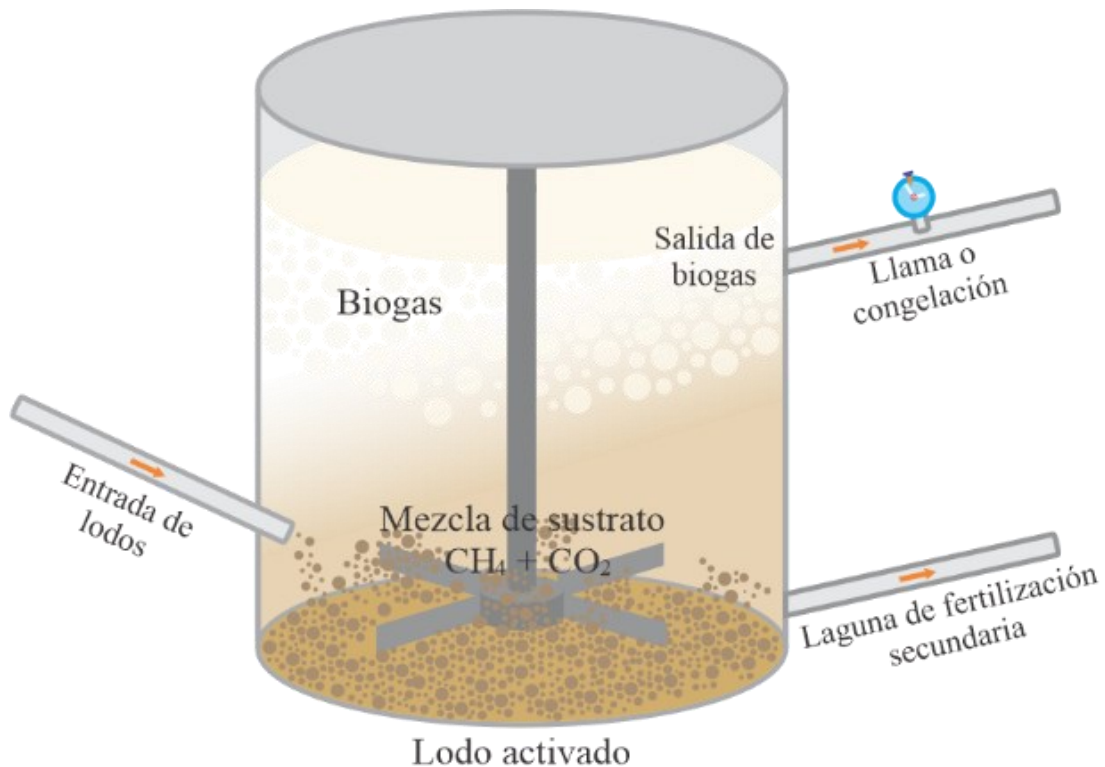
Por otra parte, mediante el biogás generado en la digestión anaeróbica, tal como se muestra en la tabla 15, se libera energía, además de la transformación del material biológico en agua, metano y dióxido de carbono, obteniendo lodos residuales sin carga microbiana patógena (Fúquene et al., 2019; Ramalho & Beltrán, 1996a), lo que hace posible cumplir con el decreto número 1287. Además, si la digestión se realiza en un digestor con capacidad entre 0,5 kg de SV/m<sup>3</sup>/día y 8 kg de SV/m<sup>3</sup>/día, se obtiene entre un 65,0% a un 70,0% de gas metano (Tejeda Benítez & Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental, 2008).

**Tabla 15.- Ventajas y desventajas del proceso de digestión anaeróbico**

(Mamani et al., 2021; Ramalho & Beltrán, 1996b)

Ventajas	Desventajas
Mejor digestión	Carga orgánica limitada
Reducción de SV rápida	Áreas grandes
Mayor cantidad de producción de fertilizante	Consumo energético elevado
Sin olores desagradables	Costos de operación elevados
Simple mecanismo microbiológico	Inversión inicial elevada
Eliminación de patógenos	Generación celular elevada

**a) Generación de biogás.** El biogás es un biocombustible barato y limpio que tiene aplicaciones en la producción de la energía eléctrica. El potencial de producción de biogás corresponde a 0,31 m<sup>3</sup>/Kg de biosólidos, de manera que 1 m<sup>3</sup> de biogás puede producir entre 5,5 Kwh a 6,0 Kwh (Guardado, 2006). Sin embargo, si el biogás es limpiado de otros gases como el ácido sulfhídrico y el dióxido de carbono, se podría obtener metano casi puro, con lo que el potencial de producción de energía eléctrica sería de entre 9,8 Kwh a 10,4 Kwh por cada metro cúbico de metano. En la Figura 11 se esquematiza el proceso interno de la digestión anaeróbica que permite la transformación de los lodos residuales en biogás.



**Figura 11.- Proceso de generación de biogás.**  
 Fuente: Adaptación de Compostando ciencia.

**b) Incineración.** Este proceso físico permite la combustión de los materiales de origen orgánico presentes en los lodos, abarcando para ello una primera etapa de secado y otra etapa subsecuente de combustión (Awasthi et al., 2022). Habitualmente, los equipos incineradores están diseñados para realizar la combustión de lodos que contienen un 75,0% de humedad. Para alcanzar su objetivo se llevan a cabo los siguientes pasos (Caballero Mayoral, 2020):

- Elevar la temperatura de los lodos hasta los 100 °C.
- Evaporación de la humedad de los lodos.
- Incremento de temperatura tanto del gas como del vapor.

- Incremento de temperatura en los sólidos secos, hasta el punto de ignición.

**2. Fertilizantes de tipo orgánico.** El uso de biosólidos como materia prima para la producción de fertilizantes orgánicos cumpliendo con la NTC 5167 que regula los productos para la industria agrícola, es otra alternativa potencial de generación de recursos económicos para las PTAR. Este se produce *ex situ*, mediante la incineración de los biosólidos generados en los procedimientos de carácter térmico. Actualmente, se investigan nuevas opciones tecnológicas para recuperar los compuestos del fósforo y del nitrógeno (Jönsson, 2019) presentes en el agua de origen residual y los biosólidos. Además, recuperar los compuestos fosforados en la PTAR, utilizando letrinas y fosas sépticas, es factible desde una perspectiva tanto económica como técnica, por medio de la conversión de los materiales biológicos en fertilizantes de tipo orgánico y/o mineral.

En este sentido, el empleo y recolección de los desechos urinarios son componentes importantes en la administración ecológica, ya que están conformados por un 66,0% de compuestos fosforados (Rose et al., 2015), y un 88,0% de compuestos nitrogenados, provenientes de desechos biológicos humanos; a su vez, estos compuestos son vitales en el desarrollo de la flora.

Estas investigaciones tienen especial interés, debido a que se espera que los recursos de origen mineral, en las próximas décadas disminuyan drásticamente, o inclusive, lleguen a agotarse. Hasta el momento, una opción predominante para recuperar estos compuestos es mediante la reutilización del agua de origen residual (WHO and UNICEF, 2017a). Cabe

destacar que el lodo residual optimiza las características de los suelos, proporcionando muchos nutrientes, en especial el lodo crudo, el deshidratado, el incinerado, el seco, el digerido y el compostado (Muscarella et al., 2023a). Sin embargo, previo a su utilización como fertilizante, se debe de tener la certeza de que se cumplen los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos preestablecidos para ello; como lo es la humedad, cenizas, el contenido de carbono orgánico oxidable total, capacidad de intercambio catiónico entre otras (Torres Cortés, 2017).

Estos nutrientes del fertilizante, a través del compostaje, se pueden incorporar de forma ralentizada, ya que la descomposición del material biológico se efectúa por los microorganismos bajo condiciones controladas, resultando en un lodo higienizado (Muscarella et al., 2023a). La riqueza en nutrientes hace posible la optimización de la reología de los suelos, ya que mejora la aireación, la retención y la absorción, por lo que es un proceso de regeneración, acondicionamiento y corrección de suelos. Este proceso se efectúa en dos etapas:

**Precomposteo.** Consiste en la mezcla inicial entre los lodos residuales y estiércol de ganado equino (Havlin et al., 2012), en una proporción 30:70 (Santoya et al., 2018). Esta relación porcentual permite obtener un pH neutro y un gran suministro de nitrógeno, carbono, potasio, fósforo, magnesio y calcio, mediante la acción de los microorganismos fermentadores (Bartram et al., 2019; Muscarella et al., 2023b). La mezcla se pone a fermentar bajo condiciones controladas de humedad, oscuridad y aireación, con lo que se obtienen niveles adecuados de temperatura y pH en 20 días.



**Vermicomposteo.** Posteriormente a alcanzar el pH próximo a la neutralidad en la etapa anterior, se siembran lombrices en la mezcla, y se dejan desarrollar por 60 días hasta obtener valores óptimos de conductividad eléctrica correspondientes a 1,15 dS/m (González et al., 2018), un pH entre 7 y 8 (Kováčik et al., 2018; Reyes et al., 2020; Tito Sánchez, 2022), y un porcentaje de contenido orgánico, es decir, microorganismos, de 50,5%.

### **Operaciones Unitarias desarrolladas en el proceso de compostaje.**

Así pues, el compostaje es una descomposición aeróbica controlada que transforma los lodos residuales en un producto final llamado Compost (Reyes Araujo et al., 2020), este proceso se desarrolla por diferentes operaciones unitarias como:

- **Almacenamiento.** Los materiales compostados se transfieren a áreas designadas para su almacenamiento, donde se les permite continuar su proceso de maduración y estabilización (Santoya et al., 2018). Durante esta etapa, se monitorea la humedad y la temperatura para garantizar que las condiciones sean favorables para la maduración del compost.
- **Curado.** El curado es una etapa adicional de maduración del compost que se lleva a cabo después del almacenamiento. Durante esta etapa, el compost se deja reposar durante un período más prolongado (Kováčik et al., 2018), generalmente de varios meses a un año, los procesos biológicos y químicos continúan contribuyendo a la estabilización adicional del compost y a la reducción de la concentración de compuestos orgánicos e inmaduros.



- **Recirculación.** En algunos sistemas de compostaje, se realiza la recirculación de materiales compostados, reintroduciendo una fracción de compost previamente maduro en las etapas de descomposición y mezclado para proporcionar microorganismos y nutrientes adicionales (Reyes Araujo et al., 2020), acelerando y mejorando su proceso de descomposición.
- **Clarificación.** Durante el proceso de compostaje, puede producirse una lixiviación de nutrientes y compuestos solubles. La clarificación permite capturar y recolectar los lixiviados para su tratamiento o uso posterior (Llaver Lucas, 2021). Se utilizan sistemas de drenaje, canales o dispositivos de recolección para capturar el lixiviado, evitando así su liberación al medio ambiente y permitiendo su gestión adecuada.
- **Descomposición.** La descomposición es una operación clave durante el proceso de compostaje, en ella los microorganismos descomponen los materiales orgánicos en compost. Durante esta etapa, los microorganismos aeróbicos consumen la materia orgánica, liberando dióxido de carbono, calor y otros subproductos (Román, Pilar; Martínez, María M; Pantoja, 2013). La descomposición es impulsada por factores como la aireación, la humedad, la temperatura y la relación de carbono a nitrógeno (C/N) adecuada; en esta etapa del proceso de compostaje se generan lixiviados que pueden ser recolectados a partir de tuberías y recirculados entre las demás pilas. (Ramírez Londoño, 2016)
- **Mezclado.** La operación de mezclado se realiza para asegurar una distribución homogénea de los materiales en el proceso de compostaje. A través del mezclado, se logra una mezcla uniforme de los ingredientes compostables, lo que facilita el acceso de los microorganismos a los nutrientes y promueve una descomposición equilibrada.



Se utilizan equipos como volteadores (Tito Sánchez, 2022), volteadoras de compost o tractores equipados con implementos para mezclar los materiales.

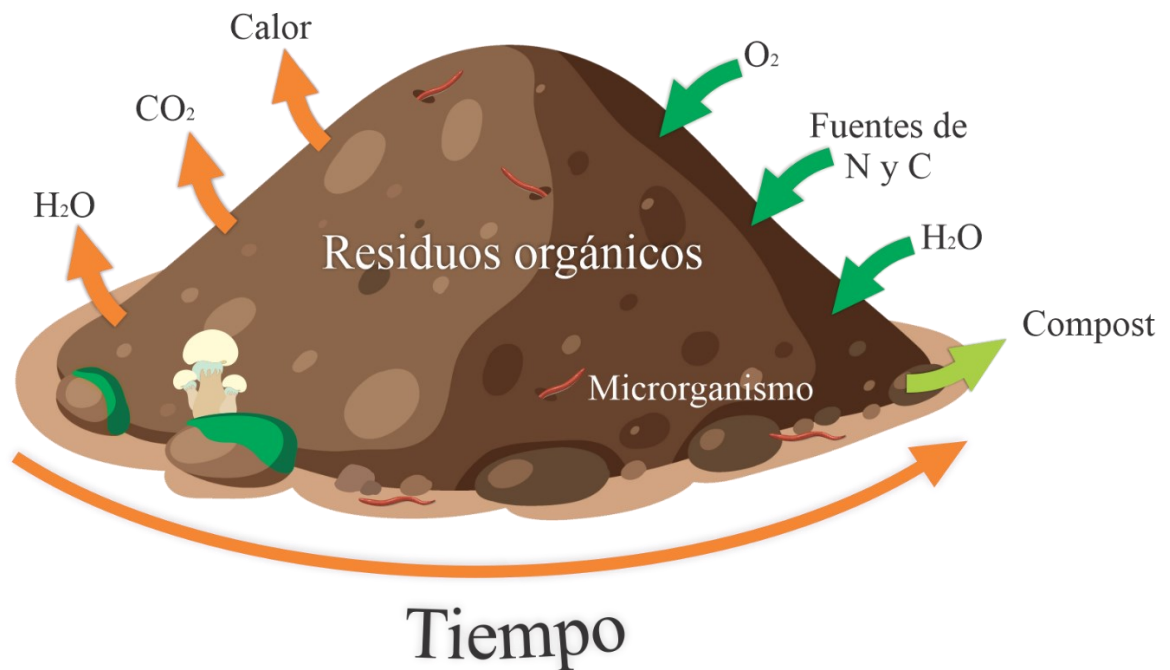
El compost es un producto totalmente comercializable al cumplir con la normatividad exigida (Bolívar et al., 2015), como el control de la humedad relativa, correlación C/N (unidades de carbono por unidades de nitrógeno), pH y temperatura. A su vez, el compostaje no requiere personal especializado para efectuar y regular todo el procedimiento. Además, es fundamental contar con una superficie lo suficientemente grande, en función de la cantidad de compostaje que se quiera generar, puesto que los biosólidos, los residuos fecales, el material orgánico vegetal y la composta terminada (Román, Pilar; Martínez, María M; Pantoja, 2013), se deben someter al mezclado en un ambiente despejado para permitir que se lleve a cabo el proceso de fermentación mediante la actividad microbiana natural en sus distintas fases.

La riqueza en nutrientes hace posible la optimización de la reología de los suelos, ya que mejora la aireación, la retención y la absorción, por lo que es un proceso de regeneración, acondicionamiento y corrección de suelos (Llaver Lucas, 2021). Este proceso requiere el control de diferentes parámetros para garantizar que suceda de manera adecuada, la figura 12 muestra los factores involucrados en el proceso de compostaje.

## Factores determinantes en el proceso de compostaje

Para realizar el compostaje, se deben de seguir determinados parámetros que variarán en el desarrollo del proceso, destacando (Kong et al., 2023):

**a) Temperatura.** Consiste en etapas de 15 °C a 45 °C (mesófila), de 45 °C a 70 °C (termófila), y una de disminución de temperatura (mesofílica final) en la etapa de maduración, estabilizando el compost al alcanzar la temperatura ambiente (Llavilla Ripa & Quintana Montoya, 2021), obteniendo un producto de aplicación agrícola y sin microorganismos patógenos.



**Figura 12.- Factores determinantes en el proceso de compostaje**

Fuente: Adaptación de *Municipal Sewage Sludge Variability: Biodegradation through Composting with Bulking Agent.* (Comesaña et al., 2018).

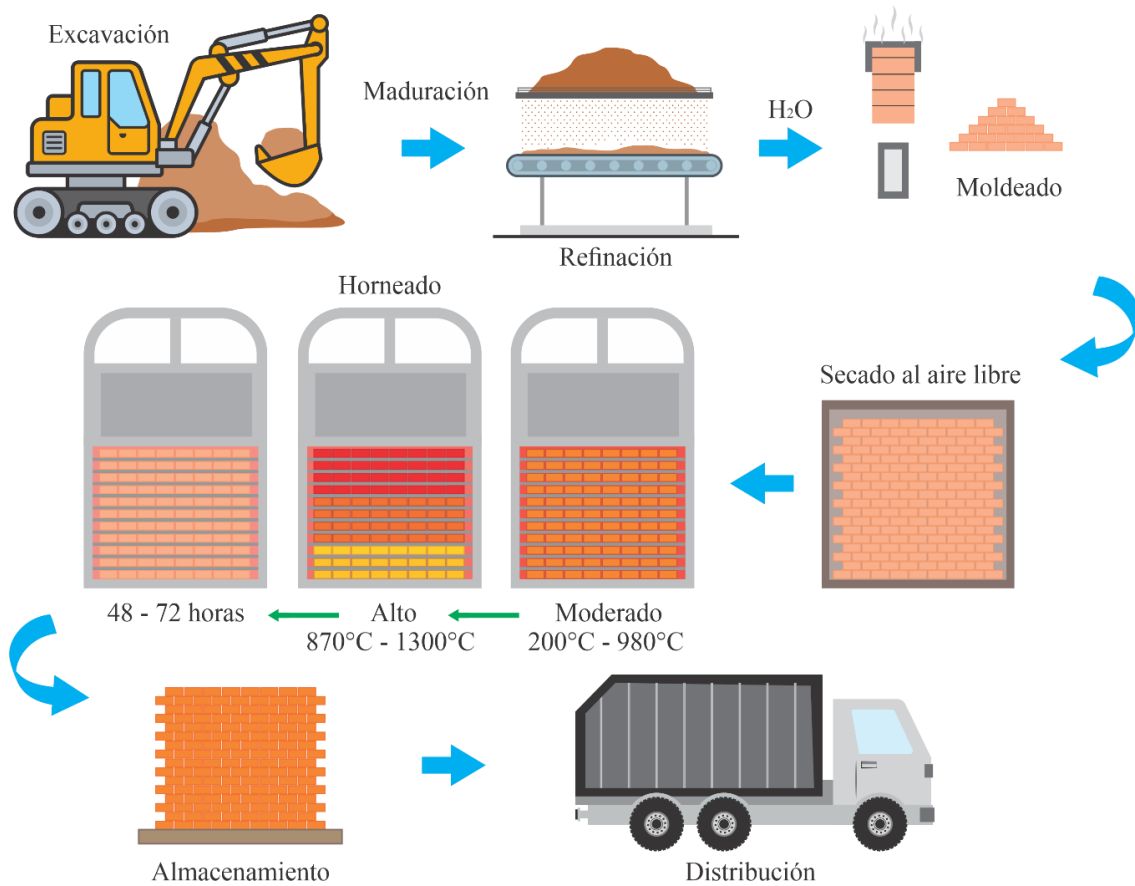
- b) **Humedad.** Debe de comprender niveles entre el 50,0% y el 60,0% para que exista una adecuada actividad microbiana.
- c) **pH.** Un valor correspondiente de 6,5 hasta 7,5 asegura el desarrollo de la mayoría de los microorganismos.
- d) **Aireación.** Se mezcla el compost cada dos o tres días. La región más exterior de la composta contiene entre 18,0% a 20,0% de oxígeno (Vargas-Pineda et al., 2019), mientras que hacia el interior de este existe entre el 0,5% y hasta el 2,0% de oxígeno.
- e) **Relación C/N.** Un valor adecuado corresponde a 25 unidades de carbono por unidad de nitrógeno, o sea, esta relación es de 25.

**3. Material de construcción.** Este sector industrial aprovecha los biosólidos generados en plantas de tratamiento de agua residual adicionándolo como materia prima en los procesos de la elaboración de ladrillos, acero, hierro y cemento (Bolívar et al., 2015). En Gran Bretaña, en el 2004, se sugirió la fabricación de morteros utilizando lodo residual, mediante el calentamiento de este y sometiéndolo a presión controlada por un cierto período de tiempo, alcanzando una temperatura de 260 °C (Rincón Carreño, 2019). Por ello, dentro de las condiciones que se requieren para este proceso, está la de construir un alto horno, así como proporcionarle un mantenimiento y acondicionamiento adecuado del suelo; para lo cual se necesita una inversión económica fuerte; inclusive se haría necesario un técnico con los conocimientos del proceso (Fuentes Molina, et al, 2019).

## **Etapas que se llevan a cabo en el proceso de fabricación de ladrillos**

El procedimiento de fabricación de ladrillos comprende las de maduración, humificación, moldeado, secado, horneado, y almacenamiento, a continuación, se describen cada una de ellas y en la figura 13 se diagrama el proceso (Muñoz Umaña, 2021):

- a) Maduración.** En ella la arcilla y los biosólidos se tamizan y/o trituran para eliminar cualquier residuo de tipo orgánico de gran tamaño, reducir la granulometría del material y proporcionar una textura uniforme, que permita obtener una mezcla homogénea de arcilla, los biosólidos y cualquier aditivo necesario. La arcilla se seca a 60 °C por 24 horas (Bazán Escalante, 2022).
- b) Humificación.** La mezcla se coloca en un laminador refinado, la mezcla o pasta obtenida se humedece para obtener las características plásticas que permitirán realizar el moldeado de los ladrillos, dejándolas reposar.
- c) Moldeado de ladrillos.** Se procede a dar la forma de ladrillo a la pasta, la mezcla se lleva a una plancha perforada en forma rectangular y se corta en tiras, este proceso se lleva a cabo bajo condiciones de vapor caliente a 130 °C (Fuentes et.al.,2019), generando que el material se compacte y la humedad se vuelva más uniforme.
- d) Secado al aire libre.** Una vez el ladrillo ha sido moldeado, se somete a secado en cobertizos con lados abiertos que permitan eliminar la mayor cantidad de agua (Lozano Olaya, 2021), y garantizar la libre circulación de aire por un periodo de 7 a 14 días hasta que se tenga un contenido de humedad aproximado entre 5,0% y 7,0%.



**Figura 13.- Esquema general de fabricación de ladrillos.**

Fuente: Elaboración propia.

- e) **Horneado.** Los ladrillos obtenidos son apilados en cámaras y sometidos a la operación de cocción, iniciando a  $700^{\circ}C$  y terminando a  $900^{\circ}C$ , con la finalidad de que se forme la parte amorfa y alcanzar las características propias de los materiales cerámicos, como las propiedades físicas y químicas y la resistencia mecánica (Martos León, 2022). Posteriormente se procede al enfriamiento controlado de los ladrillos para que no se generen fracturas en estos.
- f) **Almacenamiento.** El producto se coloca en formaciones de paquetes sobre “pallets” que hacen fácil su traslado de un lugar a otro.



Asimismo, estos ladrillos deben de ajustarse a la especificación NTC 296, para proporcionarles la dimensión, tolerancia y holgura correspondientes a la cerámica de arcilla cocida (5 cm de alto y ancho y 10 cm de largo), y puedan utilizarse en mampostería. Además, deben de evaluarse por medio de espectrometría fluorescente y de difracción de rayos X y análisis químicos cuantitativos y cualitativos; de igual manera se realizan pruebas de plasticidad, humedad, granulometría y contenido de material orgánico, así como ensayos de resistencia a la compresión de acuerdo con la NTC 4205, que establece que la resistencia mínima debe ser de 20 MPa para mampostería de tipo estructural, y de 14 MPa para la de tipo no estructural. El ensayo de absorción de agua se realiza según la NTC 4017, para absorción capilar (ABSC), sumergida (ABSS) y de ebullición (ABSE).

La granulometría debe satisfacer los requerimientos AASHTO, de arenas arcillosas y limosas, así como los de USCS, referentes a arcilla-biosólido calcinado (SM) y biosólido seco (SW). La plasticidad debe corresponder a los límites de Atterberg (98).

Por otra parte, dos de los beneficios que aporta la elaboración de ladrillos mediante biosólidos (Bazán Escalante, 2022), son:

- Reducción de su disposición como relleno, economizando costos.
- Disminución de la explotación de canteras y de los sitios de los que se extrae la arcilla.



Asimismo, se obtiene un ahorro en el gasto energético debido a (Muñoz Umaña, 2021):

- Que los biosólidos tienen un alto PCI, pues se mejora la transferencia de energía en forma de calor cuando se someten a la operación de cocción.
- Se economiza en el tiempo de cocción por la combustibilidad del material orgánico.
- La eliminación y/o retención de metales pesados presentes en los biosólidos.
- Se alcanzan mejores niveles de aislamiento a través de la porosidad generada, reduciendo el gasto energético realizado para aislar térmicamente las construcciones.
- Los ladrillos se utilizan en un 34,0% de las construcciones de cualquier tipo, se puede utilizar una gran cantidad de biosólidos.

En el caso particular de Chile, a nivel industrial se emplearían 691.980 toneladas de biosólidos para producir anualmente un aproximado de 768.867 ladrillos, por lo que, al sustituir el 15,0% de biosólidos con relación al porcentaje de biosólidos sugeridos a utilizar en la elaboración de ladrillos, se utilizarían 115.330 toneladas de lodos. En el caso de la fabricación artesanal de ladrillos, y tomando en cuenta las mismas consideraciones anteriores del 15,0% de biosólidos por ladrillo, se reutilizarían 18.623 toneladas de lodos por año (Mozo et al., 2015).

**4. Rellenos sanitarios.** Una forma muy común de disposición de residuos es el relleno sanitario, este se efectúa depositando los lodos residuales en el suelo, esparciéndolos y compactándolos para reducirlos al volumen más pequeño posible (O’Kelly, 2005; Ralph, 1975); posteriormente es cubierto por una capa de tierra que se compacta nuevamente.

Los tipos de relleno más comunes son:

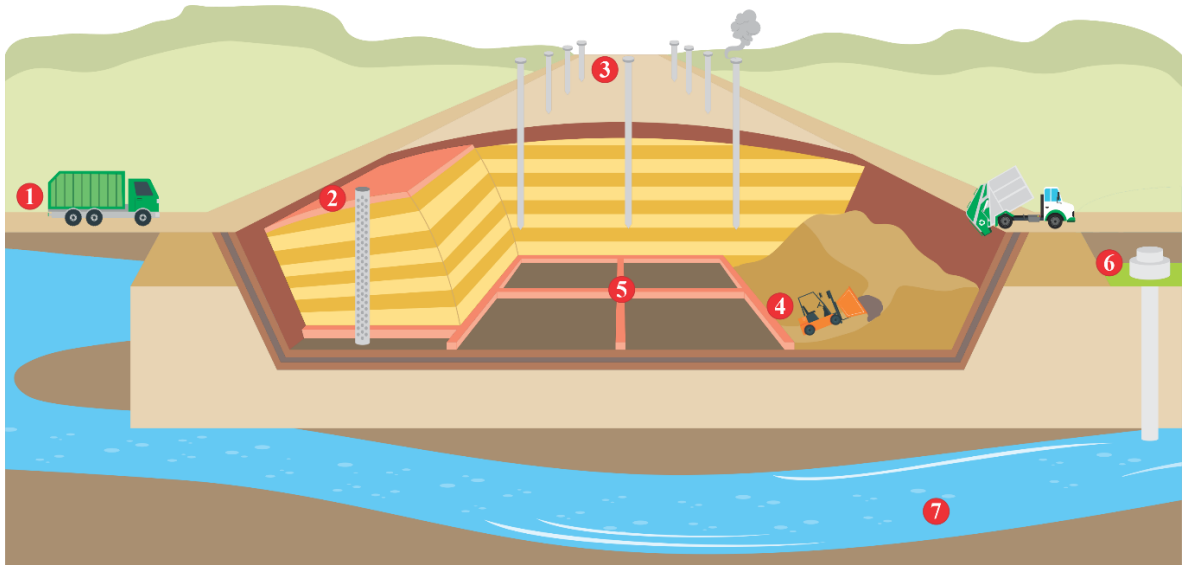


- **Método de trinchera o zanja.** Se usa un terreno plano en el que se cava una zanja de dos o tres metros de profundidad (Ralph, 1975), para depositar el relleno y después ser compactado y cubierto con el mismo material extraído de la zanja.
- **Método del área.** Utiliza terrenos planos y/o depresiones, tajos o cantera. En el primero, el relleno se deposita sobre el suelo; en el segundo, el relleno se vierte iniciando con las zonas más profundas (Krishna et al., 2022); el relleno se recubre con material extraído de otra zona y se va recubriendo con una capa de entre 10 cm a 20 cm de tierra.

Además, en la figura 14 se muestra la distribución modular característica de este tipo de construcciones, donde (Torri, 2017):

1. Los camiones conducen el biosólido al módulo que se está relleno
2. Debe contener tubos de extracción de líquidos, la base del relleno se cubre con polietileno de alta densidad para permitir la circulación de los lixiviados que recibirán un tratamiento posterior, de acuerdo con las características de los residuos sólidos allí dispuestos (Martínez et al., 2014).
3. Tubos de eliminación de gases, debido a que en el proceso de descomposición de la basura se producen gases como el metano, dióxido de carbón, Tolueno, benceno, Cloruro de vinilo y sustancias cancerígenas que se eliminan por venteo.
4. Cobertura de desechos: Los desechos se tapan y compactan con tierra o biosólidos creando capas de aprox 20 cm de espesor.
5. El sistema requiere aislar los sólidos de los líquidos y los gases, por lo cual su base de polietileno se construye 1,5 m por encima de la capa freática.





**Figura 14.- Disposición modular de relleno sanitario**

Fuente: Adaptación de ¿Que es un relleno sanitario? (Torri, 2017).

6. Pozos de control de napas, los cuales permiten tomar muestras de agua para controlar su estado y si hay o no contaminación con los lixiviados del relleno.
7. Capa freática En la construcción del relleno es fundamental que el terreno tenga la topografía adecuada y la disponibilidad de materia necesaria para efectuar el recubrimiento.

En este sentido, para que el relleno sea funcional, debe compactarse adecuadamente, ejerciendo control sobre líquidos y gases, impidiendo el ingreso de agua de lluvia y estar supervisado de manera regular (Fang et al., 2019; Ralph, 1975). Además, entre las principales preocupaciones de esta disposición son los deslizamientos montículos, las fugas de gases y la generación de lixiviados, convirtiendo los rellenos sanitarios en un potencial contaminante de suelo, afluentes, atmosférico por los malos olores producidos, las posibles afecciones a la comunidad y la proliferación de vectores.

## Disposición de biosólidos en Colombia

Los desafíos en el tratamiento de aguas residuales y gestión de biosólidos en Colombia tienen una cobertura limitada, debido a que los servicios de tratamiento cubren solamente entre el 20,0% y el 25,0% de toda la demanda (Rodríguez González et al., 2019). En cuanto a la gestión de biosólidos el país se encuentra en una etapa de ensayo y error en comparación con otros países de América latina, no obstante, se han construido plantas de tratamiento primario y secundario en ciudades principales como Bogotá, Medellín y Cali, entre otras.

En el país se genera un promedio de 274 toneladas por día de biosólidos, de las que 94 toneladas son de base seca, y poseen un elevado valor de energía, entre 2.000 kcal/kg y 4.000 kcal/kg de biosólidos, de los cuales, un 97,0% es producido por tres plantas de tratamiento (Castellanos-Rozo et al., 2020; Ortiz et al., 2022). Sin embargo, no existe una disposición adecuada de conformidad con los requerimientos ambientales y que sean seguras y viables económicamente.

Por ejemplo, para la planta de tratamiento de aguas residuales Salitre en Bogotá se obtienen aproximadamente 4000 toneladas mensuales de biosólidos Tipo B, los cuales son acumulados y transportados directamente al relleno sanitario de Doña Juana con el fin de mejorar la calidad del suelo del lugar (Acueducto agua y alcantarillado de Bogotá (EAAB-ESP), 2022). Además, se aprovechan entre 386 y 446 Kwh generados al día a partir del proceso de incineración. El biogás producido se utiliza para generación eléctrica y energía térmica, con un potencial de generación eléctrica de aproximadamente 17 Mwh/día y un potencial de generación térmica de aproximadamente 25 Mwh/día.

En la ciudad de Cali, la planta de tratamiento de aguas residuales Cañaveralejo produce aproximadamente 150 toneladas diarias de biosólidos que se acumulan y se depositan en un mono relleno (Universidad Autónoma de Occidente, 2011), como producto de la digestión de lodos se producen 400 – 500 m<sup>3</sup>/h que se utilizan para generar entre 800 – 900 kW/h que se utiliza para la operación interna de la PTAR (Bi-On, 2018); adicional de la mano con Empresas Municipales de Cali (EMCALI) se producen a partir de aproximadamente 30 toneladas mensuales de un fertilizante natural denominado Abonem de con perteneciente al grupo de fertilizantes orgánico minerales sólidos y acondicionadores para suelos, (Emcali, 2014).

Por su parte, la planta de tratamiento de aguas residuales San Fernando, en Itagüí produce en promedio 130 toneladas de biosólido al día (Melo Cerón et al., 2017) de los cuales por medio de digestión anaerobia se obtiene entre el 30,00 y el 35,00% de la demanda total energética de las instalaciones (Rodríguez González et al., 2019); también se inyecta 720 m<sup>3</sup>/h de biometano a la red de distribución de gas domiciliario.

A partir del 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 (Ministerio de Vivienda, 2014), en Colombia ha crecido la preocupación por buscar alternativas para el manejo de biosólidos, desarrollando diferentes investigaciones respecto al en el campo de biorremediadores de suelos contaminados y de uso agrícola (Amaya Corredor et al., 2019.), desde el aprovechamiento de energía (Guardado, 2006), producción de carbón activado (Huamán Siuce, 2020), y como materia prima para el desarrollo de materiales de construcción (Fuentes Molina et al., 2017), en la manufactura del cemento (Orozco & Serna, 2023),

concreto, construcción de edificios y carreteras (Díaz et al., 2019), y elaboración de materiales cerámicos (Fang et al., 2019), entre otras aplicaciones.

De lo antes mencionado, se destaca la utilización de los biosólidos como material para la construcción, ya que mediante este se resuelven distintas dificultades medioambientales con referencia a la disposición y el manejo de las aguas de origen residual (Franco Vásquez et al., 2022). De este modo, la mineralización o inertización de los biosólidos dispuestos en matrices de cerámica por medio de la incineración, posibilita la obtención de materiales adecuados para los procedimientos de construcción, como ladrillos y bloques, optimizando su resistencia térmica y mecánica, contracción, peso, porosidad, eflorescencia, congelamiento e impermeabilidad, entre otras (Fuentes Molina et al., 2017; Martos León, 2022; Muñoz Umaña, 2021).

Aunado a lo anterior, diferentes estudios han determinado que dichos biosólidos tienen cantidades semejantes de constituyentes de los que está compuesta la arcilla (óxido de silicio, óxido de aluminio, óxido de fierro, óxido de calcio (Mozo et al., 2015), óxido de potasio y óxido de sodio), entre otros, lo cual incrementa la afinidad entre ellas, haciendo factible su mezclado. Al parecer, es dicha compatibilidad aunada al intercambio iónico, el mecanismo principal mediante el que se lleva a cabo el encapsulamiento de los biosólidos en la arcilla en el proceso de cocción en la elaboración de ladrillos y bloques (García Bello, 2021), por lo tanto, este proceso se puede considerar como una etapa de estabilización-solidificación. Es por ello que en esta investigación se sugiere, realizar el aprovechamiento y la disposición de los lodos de origen residual o biosólidos que provienen de la PTAR Los Cábmulos, haciendo una sustitución relativa de la arcilla en la producción de ladrillos para la construcción, de

conformidad con la NTC número 296, para lo cual se realizaron diferentes pruebas ambientales y de carácter técnico, con el objetivo de dar solución a las dificultades planteadas por la generación de los lodos residuales, y con apego a los requerimientos de calidad que se establecen en la NTC número 4205 y la NTC número 4017.

## **Disposición de biosólidos a nivel mundial**

A este respecto, la Unión Europea genera un poco más de nueve millones de toneladas por año; en los Estados Unidos de América, se generan cerca de 7,1 millones de toneladas por año; en Australia, se producen 327.000 toneladas por año (Mohajerani et al., 2019). En este sentido, cierta investigación determinó que utilizando el 15,0% de la generación de biosólidos en la elaboración del 15,0% de ladrillos, se agotarían 5 millones de toneladas de biosólidos.

Por su parte, investigadores de la universidad de RMIT, demostraron que la incorporación de biosólidos en la elaboración de ladrillos de arcilla es una alternativa para solucionar de manera sustentable la generación de los lodos de aguas de origen residual. Además, mostraron que en el proceso de elaboración de los ladrillos solamente se requirió consumir el 50% de la energía que se gastada en la manufactura convencional de los ladrillos.

Respecto al análisis de las características reológicas de los ladrillos elaborados con biosólidos, un porcentaje de estos, entre el 10,0% y el 25,0%, presentaron una conductividad térmica menor (Fang et al., 2019), así como una porosidad mayor, igualmente aprobaron las pruebas de compresión y resistencia, en comparación con los ladrillos convencionales.

Asimismo, en la investigación se demostró una disminución en el consumo energético durante el proceso de cocción de los ladrillos, a razón de aproximadamente un 48,6% en el caso de la elaboración de ladrillos que contenían un 25,0% de biosólidos. Incluso, con el empleo de los biosólidos en la manufactura de ladrillos, se disminuiría considerablemente la huella de carbono correspondiente a la elaboración de estos, mientras se cumplen con toda la normatividad medioambiental y tecnológica de los ladrillos.

En este sentido, la investigación realizada por Liew et al, en la que utilizó biosólidos en la manufactura de ladrillos con una concentración de estos correspondiente al 10,0% y al 40,0% en peso seco, permitió establecer mediante los resultados, que el porcentaje de biosólidos empleados desempeña un papel fundamental en la calidad de estos (Liew et al., 2004). De esta manera se pone de manifiesto que, de acuerdo con la composición de la arcilla, la cual es variable, esta es capaz de tolerar porcentajes elevados de biosólidos en la composición de los ladrillos (Zat et al., 2021). Por otro lado, el impacto asociado con el medioambiente y la elaboración de ladrillos a base de biosólidos, en comparación con el proceso convencional de fabricación de estos, se ve reducido de manera significativa, puesto que la utilización en esta alternativa de aprovechamiento reduce en un porcentaje elevado la contaminación ambiental, ya que, en vez de verterlos a la naturaleza, se incorporan como material de construcción, presentando condiciones que favorecen su utilización en mampostería.

En suma, los ladrillos elaborados a partir de biosólidos poseen las propiedades adecuadas y de calidad que satisfacen los requerimientos técnicos, además de disminuir la demanda de grandes cantidades de tierra, evitando la erosión y desgaste del planeta (Martos León, 2022).

Además, los biosólidos contienen nutrientes como nitrógeno, fósforo y potasio, que pueden



actuar como fertilizantes naturales para las plantas. Si los ladrillos se utilizan en aplicaciones donde puedan estar expuestos al medio ambiente, como en muros de jardines o paisajes urbanos, los nutrientes liberados lentamente pueden contribuir a mejorar la calidad del suelo y favorecer el crecimiento de las plantas circundantes. Es importante destacar que la reutilización de biosólidos en ladrillos de construcción debe cumplir con las regulaciones y normativas ambientales vigentes.



## VI. Conclusiones

El acceso al agua potable es un derecho humano fundamental y es esencial para la vida, es por eso por lo que, para revertir la contaminación provocada por la descarga de aguas residuales producto de las actividades humanas que tienen una composición compleja (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, 2017), se requiere seleccionar un sistema de tratamiento acorde a la cantidad y a las características de calidad con las que debe cumplir el efluente. Convirtiendo el tratamiento de aguas residuales domésticas en un tema muy relevante para preservar la salud pública y proteger el medio ambiente.

El tratamiento adecuado de las aguas residuales permite a través de diferentes procesos y técnicas combinadas generar la eliminación de contaminantes y microorganismos para prevenir enfermedades y mantener el equilibrio ecológico en los ríos y cuerpos de agua, pero este tratamiento incluye una inversión en infraestructura (Ramalho et al., 2021), la adopción de políticas efectivas y la promoción de la conciencia sobre el uso eficiente del agua, en promover el reciclaje y la reutilización de los subproductos del proceso con el fin de contribuir a la sostenibilidad, a la reducción de la extracción de materias primas y la generación de residuos.

La transformación de subproductos en recurso valioso como la producción de biogás, materiales de construcción y compost crean nuevas oportunidades económicas, generan posibles ingresos y reducen los costos asociados a la gestión de los residuos (Yaser et al., 2022), utilizando un modelo de economía circular que permite reducir la utilización de alternativas como desechos sanitarios , evitando así la contaminación ambiental, la emisión

de gases efecto invernadero, el ahorro de recursos naturales y produciendo la optimización del uso de los recursos en todas las etapas ya que los residuos generados en un sector pueden convertirse en una valiosa fuente de materias primas en otro (Zat et al., 2021).

La generación de nuevos productos como el biogás a través de la descomposición aeróbica de los biosólidos, es una fuente de recuperación energética, que produce energía renovable, debido a que permite aprovechar los desechos orgánicos presentes en el agua residual para utilizarse como un sustituto de combustibles fósiles (Guardado, 2006) y contribuye a la mitigación del cambio climático en lo que respecta a la reducción de emisiones de gases efecto invernadero (Cabrales Tello, 2019), disminuyendo la cantidad de lodo presente en el proceso y los costos de su eliminación.

El compost es un subproducto del tratamiento de lodos residuales, resultante de la descomposición de los lodos orgánicos en un excelente acondicionador de suelo (Muscarella et al., 2023a), que enriquece el suelo, aportando nutrientes esenciales para mejorar su calidad y su estructura debido a que aumentando su capacidad de retención de agua y promueve la actividad de microorganismos beneficiosos (United States Environmental Protection Agency., 2021), reduciendo así la dependencia de fertilizantes químicos y fomentando las prácticas sostenibles en el sector agrícola.

La reutilización de los biosólidos generados en las plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas en la fabricación de ladrillos de construcción es una alternativa innovadora, sostenible y beneficiosa (Lozano Olaya, 2021), que permite generar materiales de construcción con valor agregado por la disminución en el uso de recursos naturales como la

arcilla, preservando el medio ambiente y minimizando la degradación de la tierra (Bazán Escalante, 2022); por otro lado tienen ventajas significativas respecto a sus características de resistencia mecánica, durabilidad y aislamiento térmico superior al de los ladrillos convencionales y durabilidad que ayudan a crear un sistema más sostenible y resiliente que beneficie a la sociedad, a economía y el medio ambiente.

Sin embargo, para todas las alternativas es fundamental asegurar que se cumplan las regulaciones y normativas aplicables que garanticen la seguridad y la protección del medio ambiente; avanzando hacia una gestión más sostenible de los recursos hídricos que permita minimizar el desperdicio, maximizar el valor de los subproductos y fomentar el desarrollo de soluciones innovadoras que contribuyan a una economía circular, de reciclaje y futuro sostenible y resiliente.

En el caso particular de la planta de tratamiento “Los Cábulos” de la ciudad de Manizales, los tratamientos planteados por el consorcio Hazen son adecuados de acuerdo a la revisión que se realizó en la literatura, debido a que se tuvo en cuenta la caracterización de las aguas de Manizales, que son ricas en nutrientes como Nitrógeno y Fósforo, además tienden a ser coloreadas o contener un porcentaje elevado de ST, debido a que se originan en gran proporción a partir de la industria textil, alimenticia y de la zona de Maltería, para el tema puntual de los biosólidos se espera una caracterización fisicoquímica y microbiológica de los lodos residuales, teniendo en cuenta los parámetros principales según la NTC5167, y teniendo en cuenta el decreto 1287 de 2014 que permitan su posterior clasificación, se considera que estos serán biosólidos de categoría B, por lo cual se considera pertinente tener

en cuenta otros procesos de reutilización de los subproductos generando una economía circular que permita disminuir la emisión de gases efecto invernadero y el costo asociado al transporte para su disposición final en rellenos sanitarios como se plantea inicialmente en el proyecto y por el contrario se pueda reutilizar este valioso recurso; aprovechando su potencial orgánico en la producción de fertilizantes, tomando en consideración el ejemplo de la planta de tratamiento operada por Emcali que transforma su residuo en un nuevo e innovador abono o como materia prima en la fabricación de ladrillos y materiales de construcción, que permitan obtener algunas ganancias en el proceso e implementar una economía circular que favorezca el medio ambiente y beneficie el proceso de la PTAR. Teniendo en cuenta que cualquiera de los procesos de reutilización que se elija, van a requerir un seguimiento de toxicidad adecuado, donde sería pertinente utilizar diferentes bioindicadores animales o vegetales como lo pueden ser germinación de semillas o pruebas ictiotóxicas.

*De esta manera convertir un residuo en una oportunidad.*

Esta revisión bibliográfica brinda diversos aportes a nivel académico desde la organización y evaluación de la información teórica existente sobre los procesos de estabilización de lodos, la disposición final de los biosólidos y los procesos comunes de su utilización. A nivel ambiental, con propuestas innovadoras y amigables con el medio ambiente que permite a las PTAR tomar decisiones frente a la disposición final que pueden desarrollar a este recurso de acuerdo con sus características. A nivel industrial, como soporte técnico que permite reducir costos, optimizar el uso de los biosólidos, los recursos naturales y tener propuestas rentables de reutilización.

## Bibliografía

- Abdelrahman, A. M., Kosar, S., Gulhan, H., Cicekalan, B., Ucas, G., Atli, E., Guven, H., Ozgun, H., Ozturk, I., Koyuncu, I., van Lier, J. B., Volcke, E. I. P., & Ersahin, M. E. (2023). Impact of primary treatment methods on sludge characteristics and digestibility, and wastewater treatment plant-wide economics. *Water Research*, 235, 119920. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.119920>
- Abdullahi, M., Stead, I., Bennett, S., Orozco, R., Abdallah, M. A.-E., Jabbari, S., Macaskie, L. E., Tzella, A., Krause, S., Al-Duri, B., Lee, R. G., Herbert, B., Thompson, P., Schalkwyk, M., Getahun, S., Dearn, K. D., & Orsini, L. (2023). Harnessing water fleas for water reclamation: A nature-based tertiary wastewater treatment technology. *Science of The Total Environment*, 905, 167224. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167224>
- Acueducto agua y alcantarillado de Bogotá (EAAB-ESP). (2022). Informe De Gases De Efecto Invernadero (Gei) De La Eab-Esp. 1–58.
- Ahn, K.-H., Park, K. Y., Maeng, S. K., Hwang, J., Lee, J., Song, K.-G., & Choi, S. (2002). Ozonation of wastewater sludge for reductio and recycling. *Water Science and Technology: A Journal of the International Association on Water Pollution Research*, 46, 71–77. <https://doi.org/10.2166/wst.2002.0293>
- Alarcón, J., Jiménez, M., & Benítez, R. (2020). Estabilización de suelos mediante el uso de lodos aceitoso. *Revista Ingeniería de Construcción*, 35(1), 5–20.
- Alfaro Arrieta, E. (2016). Caracterización de Lodos Activados en dos Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) aeróbicas en Costa. *Departamento de Aguas Residuales, Laboratorio Nacional de Aguas de Costa Rica*, 1, 1–11.
- Altıparmakı, G., Kourletakis, P., Moustakas, K., & Vakalis, S. (2022a). Assessing the effect of hydrothermal treatment (HT) severity on the fate of nitrates and phosphates in dairy wastewater. *Fuel*, 312, 122866. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.122866>
- Alzate Leal, L. M. (2021). Evaluación del dimensionamiento de los lechos de secado en diferentes plantas de tratamiento de aguas residuales del Oriente antioqueño.
- Amador-Díaz, A., Veliz-Lorenzo, E., & Bataller-Venta, M. (2015). Tratamiento de lodos, generalidades y aplicaciones. *Revista CENIC. Ciencias Químicas*, 46, 1–10.
- Amaya Corredor, C.A., Vargas Buitrago, A., Espinosa Escobar, L.F., Torres Ortiz, J.S. (2019). Evaluation of an Alternative for the Management of Aqueous Sludge Generated in a Residual Water Treatment Plant of the Poultry Sector of Santander, Colombia. *17 th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology: "Industry, Innovation, And*



- APHA-AWWA-WEF. (2005). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (21th ed., pp. 3–67 y 3–68, método 3500-Cr B).
- Appiah-Brempong, M., Essandoh, H. M. K., Asiedu, N. Y., Dadzie, S. K., & Momade, F. W. Y. (2022). Artisanal tannery wastewater: quantity and characteristics. *Heliyon*, 8(1), e08680. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e08680>
- Araque Manrique, M. del P. (2006). Evaluación de los tratamientos térmico alcalino en desinfección del lodo generado en la PTAR el Salitre. *Universidad de Los Andes*.
- Arias, D. M. M. E. (2014). Remoción de sólidos en aguas residuales de la industria harinera de pescado empleando biopolímeros. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 5, 115–123.
- Awasthi, M. K., Singh, E., Binod, P., Sindhu, R., Sarsaiya, S., Kumar, A., Chen, H., Duan, Y., Pandey, A., Kumar, S., Taherzadeh, M. J., Li, J., & Zhang, Z. (2022). Biotechnological strategies for bio-transforming biosolid into resources toward circular bio-economy: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 156, 111987. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111987>
- Ayala Garibay, E. A. (2020). Aprovechamiento de lodos residuales provenientes de las PTAR para la reducción del impacto ambiental.
- Barranco Herrero, J. (2023). Diseño de un proceso de desinfección del hogo Clostridium spp en aguas de salida de depuradora mediante fotocatalisis solar. *Universitat Politècnica de València*.
- Barroso, Y., Mantilla, P., & Betancur, J. (2019). Remoción de cromo en aguas residuales industriales mediante el uso de biomasa de Spirulina sp, sedimentación primaria y precipitación química. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 10, 141–152. <https://doi.org/10.22490/21456453.2326>
- Bartram, D., Short, M. D., Ebie, Y., Farkaš, J., Gueguen, C., Peters, G. M., Zanzottera, N. M., & Karthik, M. (2019). Chapter 6 Wastewater Treatment and Discharge. *Ippc*, 6.1-6.28. <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol5.html>
- Bazán Escalante, L. G. (2022). Elaboración de ladrillos de arcilla con inclusión de lodos residuales de la PTAR de la provincia de Celendín, Cajamarca.
- Bermeo Barreto, A., Idrovo Heredia, M., & Paúl, E. (2014). Aprovechamiento de lodos deshidratados generados en plantas de tratamiento de agua potable y residual como agregado para materiales de construcción. *Universidad de Cuenca*. <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/20868>
- Bi-On. (2018). PTAR-Cañaveralejo en la ruta de la bioenergía BI-ON 2018 *Segundo Congreso Nacional de Bioenergía Abril 2018*.

- Blaz Ríos, S. (2019). Rotíferos como indicadores de la calidad ambiental en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de San Juan de Miraflores (PTAR Sedapal-SJM).
- Bolívar, N. a, Betancur, J. F., Rodríguez Valencia, N., & Rodríguez, N. (2015). Estudio evaluativo del manejo de biosólidos para el caso de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) El Salitre. *Repositorio Institucional. Universidad de Manizales*, 37, 1–10.
- Britannica, E. (n.d.). Sewage sludge treatment. *Encyclopædia Britannica*.
- Caballero Mayoral, A. (2020). Diseño de una planta de incineración de lodos de depuradora.
- Cabrales Tello, C. C. (2019). Aprovechamiento del Biogás proveniente de plantas de tratamiento de Aguas Residuales –PTAR, como fuente de energía alternativa. *Ingeniería Ambiental*, 0(0), 51.
- Calvo Barahona, C., Rodríguez Montoya, A., Moya-Llamas, M.-J., Trapote, A., & Prats, D. (2023). Eliminación de microcontaminantes emergentes en lodos de depuradora mediante procesos de oxidación avanzada: peróxido de hidrógeno y ozono.
- Candela Levano, G. M. (2020). Propuestas de estabilización y aprovechamiento de lodos de PTAR y BES en Perú basadas en su caracterización fisicoquímica y microbiológica.
- Cantón Pallás, A. (2022). Estudio técnico y económico de una planta incineradora para la gestión residuos en forma de lodos de depuración de aguas residuales. *Universitat Politècnica de València*.
- Cárdenas Torrado, G., & Molina Pérez, F. J. (2022). Alternativas para tratar lodos originados en sistemas de tratamiento de aguas residuales: una revisión. In *Ingeniería* (Vol. 27). scielocol.
- Castañeda Náñez, H. J., & López Velázquez, R. (2012a). Los Biosólidos, una oportunidad en la agricultura.
- Castellanos Alfonso, J.J & Monsalve Alfonso, Y.S., (2017). Diagnóstico de la calidad del agua implementando parámetros de sólidos suspendidos volátiles y totales para la evaluación del potencial de autodepuración [Universidad Católica de Colombia]. In *Journal of Chemical Information and Modeling* (Vol. 53, Issue 9). <http://www.elsevier.com/locate/scp>
- Castellanos Roza, J., Galvis-López, J. A., Castellanos, N. A., Manjarrés Hernández, E. H., & Rojas, A. L. (2020). Assessment of two sludge stabilization methods in a wastewater treatment plant in Sotaquirá, Colombia. *Universitas Scientiarum*, 25(1), 17–36.
- Castillo Sánchez J.G, Balarezo Saltos L.D, Vines Obando M.B, Zambrano Rizo, (2020). Alternativas en la estabilización de lodos provenientes de plantas de tratamiento de aguas residuales
- Castillo Villanueva, W. (2017). Alternativas de deshidratación de lodos de una planta de tratamiento de agua potable.



- Castro, M. C. (2018). La frágil normatividad para la disposición final de lodos residuales en Colombia.
- Chen, Y., Wang, C., Dong, S., Jiang, L., Shi, Y., Li, X., Zou, W., & Tan, Z. (2019). Microbial community assembly in detergent wastewater treatment bioreactors: Influent rather than inoculum source plays a more important role. *Bioresource Technology*, 287, 121467. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121467>
- Cieślik, B. M., Namieśnik, J., & Konieczka, P. (2015). Review of sewage sludge management: standards, regulations and analytical methods. *Journal of Cleaner Production*, 90, 1–15. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.11.031>
- Col., V. P. U. y. (2004). Toxicity of metals and metals mixtures: analysis of concentration and time dependence for zinc and copper (pp. 3651–3658).
- Comesaña, D. A., Comesaña, I. V., & Iglesia, S. M. de la. (2018). Municipal Sewage Sludge Variability: Biodegradation through Composting with Bulking Agent (I. X. Zhu, Ed.; p. Ch. 6). IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.75130>
- Comisión Nacional del Agua. (2015). Manual de agua potable, alcantarillado y Saneamiento Operación y Mantenimiento de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: Tratamiento y Disposición de Lodos (p. 342).
- Congreso Colombiano. (1994). Ley 142 de 1994. *Diario Oficial*, 1994(41.433), 597.
- Conhydra, C. H. –. (2018). Planta de Tratamiento de Aguas Residuales los Cambulos.
- Corral-Bobadilla, M., González-Marcos, A., Alba-Elías, F., & Diez de Santo Domingo, E. (2020a). Valorization of bio-waste for the removal of aluminum from industrial wastewater. *Journal of Cleaner Production*, 264, 121608. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121608>
- Cortés García, F. J. (2020). La economía circular. Ideas claves para la comprensión de un nuevo modelo de gestión de los recursos económicos. *Universidad Autónoma de Chile*.
- Díaz Cuenca, E., Alvarado Granados, A. R., & Camacho Calzada, K. E. (2012). El tratamiento de agua residual doméstica para el desarrollo local sostenible: el caso de la técnica del sistema unitario de tratamiento de aguas, nutrientes y energía (SUTRANE) en San Miguel Almaya, México. *Quivera. Revista de Estudios Territoriales*, 14(1), 78–97.
- Díaz Gonzáles, A. (2021). Identificación y enriquecimiento de un consorcio bacteriano en aguas y lodos residuales de origen doméstico para producir biopolímeros del tipo polihidroxialcanoatos PHA's: revisión documenta (Vol. 10). *Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca*.
- Díaz, P. A. R., Guzmán, J. M. G., & Morales, P. A. J. (2019). Utilización de biosólidos de PTAR como adición en adoquines de concreto para su posible uso en vías de servicio peatonal en Colombia, Caso de Estudio España. *Semilleros*, 6(11), 51–64.

- Díaz Ruiz, A. N., Arenas Taborda, A., Hoyos Bastidas, O., Ramírez, D., Niño García, J. P., & García Chaves, M. C. (2022). Dinámica funcional de la comunidad bacteriana del lodo activado de una planta de tratamiento de agua residual y su relación con variables ambientales y de operación. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 24(2), 26–35.
- Dimas Turmequé, A. F. (2022). Eficiencia energética en el tratamiento de aguas residuales en Colombia: Metodología para la selección de alternativas en pequeñas y medianas poblaciones. *Universidad Nacional de Colombia*.
- Dolnicar, S., Chapple, A., Trees, a. J. "Angiostrongylus-V. in N. D. in N. Wales. " V. R. 120. 17 (1987): 424-424. (1987): 424-424., Team, R. C., Mobley, C. D., Fenkçi IV, Maternal Fizyoloji. "Çiçek MN, Ed." Kadın Hastalıkları ve Doğum Bilgisi, Öncü Basımevi, A. (2004): 161-9., Dolnicar, S., Chapple, A., Beck, A. (1967). Depression: Clinical, Experimental & Theoretical Aspects. Philadelphia, P. U. of P. P., ĐCengel, Y. A. B., ĐCengel, M. A. Y. A., Boles, M. A., ĐCengel, Y. A. C., ĐCengel, J. M. Y. A., & Cimbala, J. M. (2012). T. (No. 536. 7). M.-H. (2012). T. (No. 536. 7). M.-H., Chabaud, D., & Codron, J. M., Raman, Shanti; Hodes, D., Pv, T., Av, T., & Totox, T. (2015). Scholar (3). In *Annals of Tourism Research* (Vol. 3, Issue 1, pp. 1–2).
- Doménech, J. (2003). Depuración y potabilización del agua. *Offarm*, 22(8), 110–116.
- Donado H, R. (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.
- Donado, R. (2013). Plan de gestión para lodos generados en las PTAR de los municipios Curumal y San Martín de los Llanos en el departamento del Meta. *Pontificia Universidad Javeriana*.
- Drangert, J.-O. (2020). Urban water and food security in this century and beyond: Resource-smart cities and residents. *AMBIO A Journal of the Human Environment*. <https://doi.org/10.1007/s13280-020-01373-1>
- Drangert, J.-O., & Kjerstadius, H. (2023). Recycling – The future urban sink for wastewater and organic waste. *City and Environment Interactions*, 19, 100104. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cacint.2023.100104>
- Dursun, S., Oms, Arévalo, Ing., González Santamaria, D. H., & Echeverri Villa, J. A. (2017). Aguas Residuales: el Recurso desaprovechado. Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2017. *Ecos de Economía: A Latin American Journal of Applied Economics*, 8(18), 13–15.
- Edo-Alcón, N., Gallardo Izquierdo, A., & Colomer Mendoza, F. J. (2019). El tratamiento mecánico biológico de residuos sólidos urbanos: tipos de plantas, tecnologías y equipamientos disponibles.
- Emcali. (2014). Emcali obtiene novedoso fertilizante a partir de los lodos de la PTAR.
- Environmental Protection Agency, & (EPA). (1999). Normas para el uso o eliminación de lodos de depuradora (Vol. 64, Issue 149, pp. 42552–42573).

- EPA. (2007a). Guidelines Establishing Test Procedures for the Analysis of Pollutants (p. Part III, 40 CFR, Part 122, 136).
- Espinoza Eche, J. J. (2022). Innovación en la gestión de lodos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales de origen doméstico en Lima-Perú.
- Esteller, M. V. (2002). Vulnerabilidad de acuíferos frente al uso de aguas residuales y lodos en agricultura. *Hidrogeología*, 2.
- Estévez Valencia, C., Herrera Ascencio, P., & Tiribocchi, A. (2019). Garantizar la disponibilidad de agua, su gestión sostenible y el saneamiento para todos: implementación de políticas públicas en América Latina y el Caribe. [https://unesdoc.unesco.org/notice?id=p::usmarcdef\\_0000370289](https://unesdoc.unesco.org/notice?id=p::usmarcdef_0000370289)
- Etienne, P., & Debellefontaine, H. (2007). Reduction of Excess Sludge Produced by Biological Treatment Processes: Effect of Ozonation on Biomass and on Sludge. *Ozone-Science & Engineering - OZONE-SCI ENG*, 29, 415–427. <https://doi.org/10.1080/01919510701593762>
- Fang, X., Wang, L., Poon, C. S., Baek, K., Tsang, D. C. W., & Kwok, S. K. (2019). Transforming waterworks sludge into controlled low-strength material: Bench-scale optimization and field test validation. *Journal of Environmental Management*, 232, 254–263. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.11.091>
- Fernández de Peñaranda Alejandro, A. (2023). Estudio de la presencia de bacterias multi-resistentes en lodos y aguas de uso agrícola de la Comunidad Valenciana en el contexto de la seguridad alimentaria.
- Fioravanti, M., Vega, N., Hernández, C., Okumoto, S., & Yeomans, J. (2005). Eficiencia De Los Microorganismos Eficaces (Em) En La Estabilización De Lodos Sépticos Para Su Uso Agrícola. *Tierra Tropical*, 1(1), 69–76.
- Forero Torra, J. F., & Trigos Duarte, E. F. (2020.). Acondicionamiento químico y espesamiento de los lodos producidos en la planta de tratamiento de agua potable Bosconia del acueducto metropolitano de Bucaramanga.
- Fragoso-Castilla, P. J., Rubiano, L. A., & Kerguelen, J. J. (2021). Análisis de variables fisicoquímicas en el proceso de remoción de coliformes en el sistema de lagunas de oxidación, Salguero, Valledupar (Colombia). In *Información tecnológica* (Vol. 32, pp. 113–122). Scielocol.
- Franco Vásquez, V., Gabalo Leguizamo, N., Méndez Flórez, D. L., Roa Rodríguez, E. A., & Cortés Cifuentes, D. (2022). Aplicación de la economía circular, en el aprovechamiento de los lodos residuales generados en Gelco Manizales. *Especialización en Gerencia Procesos de Calidad e Innovación Virtual*.
- Fuentes Molina, N., Isenia León, S. A., & Ascendo Mendoza, J. G. (2017). Biosólidos de tratamiento de aguas residuales domésticas, como adiciones en la elaboración de ladrillos cerámicos. In *Producción + Limpia* (Vol. 12, pp. 92–102). scielocol.

- Fuentes Molina, Natalia; Isenia León, Samir Alfonso; Ascencio Mendoza, J. G. (2019). Adición de lodos residuales en la elaboración de matrices de cerámicas. *Revista EIA*, 16(32), 13–25.
- Fúquene Yate, D., Chaves, C., Yate-Segura, A., Giraldo, D., Chiriví-Salomón, J., López, C., & Ausique, V. (2019). *Tratamiento de aguas residuales* (pp. 146–171). <https://doi.org/10.22490/9789586516358.08>
- Galvis, J., & Rivera, X. (2013). Caracterización Físicoquímica y Microbiológica de los lodos presentes en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Industriales (PTAR) de la empresa jugos HIT de la ciudad de Pereira. In *Universidad Tecnológica de Pereira* (Vol. 66, Issue 1997).
- García Baena, M. (2021). Tratamiento de lodos procedentes de EDAR mediante la aplicación de tecnología renovable.
- García Bello, N. E. (2021). Análisis y propuesta para el uso potencial de biosólidos de PTAR en la fabricación de ladrillos de arcilla.
- García, D. M. (2022). Mejora de tratamiento para el secado de fangos de una estación depuradora de aguas residuales. *Universidad de La Laguna*.
- García, J. C. G., & Ponce, S. C. G. (2021). Evaluación de la adaptación de la lombriz roja «Eisenia foetida» a lodos de lixiviación de un relleno sanitario con perspectivas a su utilización en procesos de vermicompostaje. *Conciencia Digital*, 4(3.1), 6–22.
- González, M. E., Rengifo, A., Piñeros Marín, D. P., Buitrago Ramírez, L. M. (2023). Reconocimiento de algas, protozoos y metazoos como bioindicadores ambientales. En F.C. Gómez Meneses, L.M., Gómez Melo, D., Valencia Enríquez, S., Gómez Herrera, J.M., López Moreno y Villota Paz, J. M. *Avances y Desafíos En Las Ciencias y La Ingeniería 2023: Nuevos Conocimientos Para Un Futuro Sostenible*, (pp. 207-220). Editorial UNIMAR. <https://doi.org/10.31948/editorialunimar.208.c361>
- González-Salas, U., Robles, M., Vázquez-Vázquez, C., García-Hernández, J., Fortis-Hernández, M., & Mendoza-Retana, S. (2018). Productividad de genotipos de maíz forrajero bajo fertilización orgánica y propiedades físicoquímicas del suelo. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. <https://doi.org/10.29312/remexca.v0i20.1002>
- Granja Ruales, J. E. (2021). Dinámica de la población microbiana en lodos granulares aerobios para el tratamiento biológico de aguas residuales domésticas de Azaya.
- Guanin Pallasco, Leysvin Camil., & Reatiqui Chiluisa, Diana Nataly. (2022). Eutrofización de aguas residuales domiciliarias con absorción biológica de Nitrógeno y Fósforo, Sector San José de Pichul.
- Guardado, J. A. (2006). Tecnología del biogás. *Energía y Tu*, 34, 1–7.

- Guerra Puican, H. M. (2020). Propuesta de tratamiento de los lodos residuales de la planta de producción n°1 de Epsel S.A. para minimizar el impacto ambiental sobre el canal Cois. *Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo*.
- Gulhan, H., Dizaji, R. F., Hamidi, M. N., Abdelrahman, A. M., Basa, S., Kurt, E. S., Koyuncu, I., Guven, H., Ozgun, H., Ersahin, M. E., & Ozturk, I. (2023). Use of water treatment plant sludge in high-rate activated sludge systems: A techno-economic investigation. *Science of The Total Environment*, 901, 166431. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166431>
- Gutiérrez Espinoza, J. F. (2022). Capacidad de adsorción de cationes de las sustancias poliméricas extracelulares obtenidas desde lodos sanitarios.
- Gutiérrez, R. A., & Stevanato, A. B. (2021). Emprendedurismo, movilización social e innovación: la gestión de residuos en municipios argentinos. *Revista Iberoamericana de Estudios Municipales*, 24, 47–67.
- 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, N, 248. <https://doi.org/ISSN 1692-3324>
- Havlin, J., Moebius-clune, B., Indbo, D., Kozlowski, D., & Robinson, C. (2012). Chemical Properties of Soil, Soil Fertility and Nutrient Management. <https://doi.org/10.2136/2012.knowsoil.c4>
- Huamán Siuce, M. (2020). Aprovechamiento de lodos activados provenientes de planta de tratamiento de aguas residuales para la obtención de carbón activado.
- Hudaib, B. (2021a). Treatment of real industrial wastewater with high sulfate concentrations using modified Jordanian kaolin sorbent: batch and modelling studies. *Heliyon*, 7(11), e08351. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e08351>
- IANAS, R. I. de A. de C. (2019). Calidad del Agua en las Américas: Riesgos y Oportunidades.
- Ikehata, K., Jodeiri, N., & El-Din, M. (2006). Degradation of Aqueous Pharmaceuticals by Ozonation and Advanced Oxidation Processes: A Review. *Ozone-Science & Engineering - OZONE-SCI ENG*, 28, 353–414. <https://doi.org/10.1080/01919510600985937>
- Jaume, A. T. (2013). Depuración y regeneración de aguas residuales urbanas. Publicaciones de la *Universidad de Alicante*.
- Jaume, A. T. (2020a). Depuración y regeneración de aguas residuales urbanas (3rd ed.). *Universidad de Alicante*. <https://books.google.com.co/books?id=2bhTdcSgrBkC>
- Jönsson, H. (2019). Phosphorus, nitrogen, potassium and sulphur—Availability, vulnerability and recovery from sewage. *Energy and Technology Report*, 105.
- Joseph, C. G., Farm, Y. Y., Taufiq-Yap, Y. H., Pang, C. K., Nga, J. L. H., & Li Puma, G. (2021). Ozonation treatment processes for the remediation of detergent wastewater: A comprehensive

- review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(5), 106099. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106099>
- Kaur, N. (2021a). Different treatment techniques of dairy wastewater. *Groundwater for Sustainable Development*, 14, 100640. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.gsd.2021.100640>
- Kong, Y., Zhang, J., Yang, Y., Liu, Y., Zhang, L., Wang, G., Liu, G., Dang, R., Li, G., & Yuan, J. (2023). Determining the extraction conditions and phytotoxicity threshold for compost maturity evaluation using the seed germination index method. *Waste Management*, 171, 502–511. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.09.040>
- Kosar, S., Isik, O., Cicekalan, B., Gulhan, H., Cingoz, S., Yoruk, M., Ozgun, H., Koyuncu, I., van Loosdrecht, M. C. M., & Ersahin, M. E. (2023). Coupling high-rate activated sludge process with aerobic granular sludge process for sustainable municipal wastewater treatment. *Journal of Environmental Management*, 325, 116549. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116549>
- Kováčik, P., Salamún, P., Smoleň, S., & Renčo, M. (2018). Impact of Vermicompost as Component of Growing Medium on Phytomass Formation of Radish (*Raphanus Sativus* L.). *Agriculture (Pol'nohospodárstvo)*, 64, 106–115. <https://doi.org/10.2478/agri-2018-0011>
- Krishna, D., Sachan, H. K., & Jatav, H. S. (2022). *Management of Sewage Sludge for Environmental Sustainability BT - Sustainable Management and Utilization of Sewage Sludge* (V. D. Rajput, A. N. Yadav, H. S. Jatav, S. K. Singh, & T. Minkina, Eds.; pp. 353–381). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-85226-9\\_17](https://doi.org/10.1007/978-3-030-85226-9_17)
- Lage Filho, F. A., Carvalho, L. R. F., & Lopes, M. L. A. (2011). Ozonation of sediments from an urban lake: an exploratory investigation. In *Brazilian Journal of Chemical Engineering* (Vol. 28). scielo.
- Lalli, P. M. (2007). Manual of chemical and biological methods for seawater analysis. In *Manual de Técnicas del CIOH* (pp. 31–33).
- Lapuerta Risueño, M. (2020). Secado solar de lodos de depuradora para el ahorro energético en los procesos de post-tratamiento. ETSI\_Energia.
- Lazcano, César. (2016a). Biotecnología ambiental de aguas y aguas residuales. 552. <https://www.ecoediciones.com/libros/libros-de-ingenieria-ambiental/biotecnologia-ambiental-de-aguas-y-aguas-residuales-1ra-edicion/>
- Lee, W., An, S., & Choi, Y. (2021a). Ammonia harvesting via membrane gas extraction at moderately alkaline pH: A step toward net-profitable nitrogen recovery from domestic wastewater. *Chemical Engineering Journal*, 405, 126662. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.126662>
- Liew, A., Idris, A., Wong, C., Abdul Samad, A. A., Megat Mohd Noor, M. J., & Baki, A. (2004). Incorporation of Sewage Sludge in Clay Brick and its Characterization. *Waste Management &*



*Research: The Journal of the International Solid Wastes and Public Cleansing Association, ISWA*, 22, 226–233. <https://doi.org/10.1177/0734242X04044989>

- Llano, B. A., Cardona, J. F., Ocampo, D., & Ríos, L. A. (2014). Tratamiento Físicoquímico de las Aguas Residuales Generadas en el Proceso de Beneficio de Arcillas y Alternativas de Uso de los Lodos Generados en el Proceso. *Información\textthreesuperiorn Tecnol\textthreesuperiorgica*, 25, 73–82.
- Llaver Lucas, S. A. (2021). Planificación de la construcción y operación de una planta de escala industrial de compostaje con residuos orgánicos provenientes de la agroindustria en la provincia de Mendoza-Argentina: Una propuesta para la valoración de residuos.
- Llavilla Ripa, F. Y., & Quintana Montoya, K. (2021). Efecto del control de la temperatura en la fase termofílica del proceso de compostaje con inoculación de organismos eficientes.
- Lorenzo, E. V., Llanes Ocaña, J. G., Fernández, L. A., & Bataller Venta, M. (2009). Reúso de aguas residuales domésticas para riego agrícola. Valoración crítica. *Revista CENIC Ciencias Biológicas*, 40(1), 35–44.
- Lozano Olaya, A. J. P. (2021). Elaboración de ladrillos cerámicos artesanales utilizando lodos sedimentados generados en las lagunas de estabilización de Epsel de San José–Lambayeque para la construcción de muros de tabiquería-2019.
- Maceo, A. (2013). Caracterización de las aguas residuales de la comunidad “Antonio Maceo” de la Universidad de Oriente. *Revista Cubana de Química*, 25(2), 131–137.
- Macías, J. G. L. (2013a). Los lodos de las plantas de tratamiento de aguas residuales, ¿Problema o Recurso?
- Madrid, A. J. (2020). *Marco legal. Efecto y minimización de vertidos*. Editorial Elearning, S.L.
- Mamani, J., Llumipanta, F., Ramos, S., Rea, J., Alucho, J., Saltos, D., Llanos, F., & Pilco, C. J. (2021). Sistemas de producción de biogás: fundamento, técnicas de mejora, ventajas y desventajas. *Agroindustrial Science*, 11(2), 239–247.
- Manjarrés, H. E. H., Castellanos, R. J. M., Galvis, L. J. A., & Merchán, C. N. A. (2021). Uso de biosólidos en Colombia: métodos de estabilización y aplicaciones a nivel agrícola. 4(1), 9–27.
- Marín Bahamón, D. (2019). Propuesta de aprovechamiento de lodos residuales provenientes de una PTAR del municipio de Sopó Cundinamarca para la producción de un fertilizante organo-mineral. *Fundación Universidad de América*.
- Marti, E. J., & Batista, J. R. (2014). Impact of secondary treatment types and sludge handling processes on estrogen concentration in wastewater sludge. *Science of The Total Environment*, 470–471, 1056–1067. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.10.070>

- Martínez López, A., Padrón, W., Rodríguez Bernal, O. F., Chiquito Coyotl, O., Escarola Rosas, M., Hernández Lara, J. M., Elvira Hernández, E., Méndez, G. A., Tinoco Magaña, J. C., & Martínez-Castillo, J. (2014). Alternativas actuales del manejo de lixiviados. *Avances En Química*, 9, 37–47.
- Martín-Pozo, L., de Alarcón Gómez, B., Rodríguez Gómez, R., García Córcoles, M. T., Çipa, M., & Zafra Gómez, A. (2019). Analytical methods for the determination of emerging contaminants in sewage sludge samples. A review. *Talanta*, 192, 508–533. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.talanta.2018.09.056>
- Martos León, S. G. (2022). Variación de la resistencia a la compresión de los ladrillos, debido a los factores: materiales y proceso de fabricación, a partir de investigaciones realizadas en el Perú.
- Maryam, B., & Büyükgüngör, H. (2019). Wastewater reclamation and reuse trends in Turkey: Opportunities and challenges. *Journal of Water Process Engineering*, 30(November 2016), 100501. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2017.10.001>
- Mansur Aisse, M. Fernandes. F, Silveira C., Kiyomi Kuroda E. (2022) Caracterización general de lodos y biosólido. *Universidad de Boyacá*, 44. <https://doi.org/10.24267/9789585120136.3>.
- McKenna, P., Zakaria, F., Guest, J., Evans, B., & Banwart, S. (2023). Will the circle be unbroken? The climate mitigation and sustainable development given by a circular economy of carbon, nitrogen, phosphorus and water. *RSC Sustainability*, 1(4), 960–974. <https://doi.org/10.1039/D2SU00121G>
- Melero, J. A., Vozmediano, J. M., Urraca, Y. S., Martín, M. P., & Amor, D. A. (2020). Contaminación hídrica y depuración de aguas residuales. *Universidad Rey Juan Carlos*.
- Melo Cerón, A. R., Rodríguez González, A., & González Guzmán, J. M. (2017). Manejo de Biosólidos y su posible aplicación al suelo, caso Colombia y Uruguay. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 8(1), 217–226. <https://doi.org/10.22490/21456453.1851>
- Men, C., & Fall, C. (2019). Métodos Experimentales para el Tratamiento de Aguas Residuales. <https://doi.org/10.2166/9781780409252>
- Mendoza Sanchez, S. Y. (2022). Revisión sistemática: Análisis de tratamientos de desinfección de lodos residuales.
- Mijares, G. R. (1967). Tratamientos del agua residual. Lit. y Tip. Vargas.
- Min. Vivienda. (2019). Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales para la cuenca del río Chinchiná es una realidad.
- Ministerio De Ambiente Y Desarrollo sostenible. (2015). Resolución 631 de 2015. *Diario Oficial No. 49.486 de 18 de Abril de 2015*, 2015(49), 73.
- Ministerio de Desarrollo Económico Dirección de Agua Potable y Saneamiento Básico. (2000). Reglamento Técnico Del Sector De Saneamiento Básico Agua Potable Y Ras - 2000 - Tratamiento



- De Aguas Residuales. Título E. *Reglamento Técnico Del Sector De Agua Potable Y Saneamiento Básico*, 150.
- Ministerio de Desarrollo Social y Medio Ambiente. (2001). Reglamentación de la Ley N° 24.051. Manejo sustentable de barros generados.
- Ministerio de la protección social; Ministerio de Ambiente, V. y D. T. (2007). *Decreto número 1575*.
- Ministerio de la Protección Social, Ministerio de Ambiente, v. y., & Territorial., D. (2007). Características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano. *Resolución número 2115*.
- Ministerio de Vivienda, C. Y. T. (2014). *Decreto 1287 de 2014* (Vol. 2014, Issue July, pp. 1–18).
- Ministerio de Vivienda, C. Y. T. (2014). Decreto número 1287 de 2014. *Bogotá D.C*, 1–9.
- Ministerio del Medio Ambiente. (2002). Gestión para el manejo, tratamiento y disposición de las aguas residuales municipales (Issue July, pp. 1–23).
- Ministerio secretaría general de la presidencia; subsecretaría general de la presidencia. (2009). Decreto 4. *Decreto*, 4(2009), 1–15.
- Miranda, A. D. O. (2019). Deshidratación de lodos generados en sedimentadores de plantas de tratamiento de agua potable. *Agua, Saneamiento & Ambiente*, 14(1), 55–60.
- Mohajerani, A., Ukwatta, A., Jeffrey-Bailey, T., Swaney, M., Ahmed, M., Rodwell, G., Bartolo, S., Eshtiaghi, N., & Setunge, S. (2019). A proposal for recycling the world’s unused stockpiles of treated wastewater sludge (biosolids) in fired-clay bricks. *Buildings*, 9(1), 14.
- Mozo, W., a, G., & Camargo, G. (2015). Efecto de la adición de biosólido (seco) a una pasta cerámica sobre la resistencia mecánica de ladrillos Effect of adding biosolids (dry) to a ceramic paste on mechanical strength of bricks. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 14(27), 61–78.
- Muñoz, C. E. P., Amparo, B., & Betancur, W. (2019). Estabilización de lodos biológicos provenientes de una planta de tratamiento de agua residual mediante pacas biodigestoras. *Producción+ Limpia*, 14(1), 33–45.
- Muñoz Umaña, L. F. (2021). Revisión de estado del arte: “la industria de la fabricación de ladrillos como complemento para la gestión del tratamiento a las aguas residuales. *Universidad Santo Tomás Seccional Tunja. Facultad de Ingeniería Civil*, 90. <http://hdl.handle.net/11634/35025>.
- Muscarella, S. M., Badalucco, L., Laudicina, V. A., Wang, Z., & Mannina, G. (2023a). Chapter 6 - Wastewater treatment sludge composting (G. Mannina, A. Pandey, & R. B. T.-C. D. in B. and B. Sirohi, Eds.; pp. 115–136). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99920-5.00008-1>

- Naciones Unidas. (2022). Oportunidades de la economía circular en el tratamiento de aguas residuales en América Latina y el Caribe. [www.issuu.com/publicacionescepal/stacks](http://www.issuu.com/publicacionescepal/stacks)
- Noguera, K., & Olivero, J. (2010). Los rellenos sanitarios en Latinoamérica: caso colombiano. *Revista de La Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 34(132), 347–356.
- O’Kelly, B. (2005). Sewage Sludge to Landfill: Some Pertinent Engineering Properties. *Journal of the Air & Waste Management Association* (1995), 55, 765–771. <https://doi.org/10.1080/10473289.2005.10464670>
- Olmos, R. R. (2003a). El agua en el medio ambiente: muestreo y análisis. *Universidad Autónoma de Baja California*. <https://books.google.com.co/books?id=b8l-xhcHPEYC>
- Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la C. y la C. (2017). Agua Residual, El recurso Desaprovechado. *Informe Mundial de Las Naciones Unidas Sobre El Desarrollo de Los Recursos Hídricos*, 65–67.
- Oropeza García, N. (2006). Lodos residuales: estabilización y manejo. *Caos Conciencia*, 1(figura 1), 51–58.
- Orozco Yacumal, A. M., & Serna Anacona, Y. M. (2023). Elaboración de bloques de concreto para encapsular el mercurio contenido en lodos residuales de la mina artesanal Aurífera Curiaco del municipio de Santa Rosa-Cauca. *Uniautónoma del Cauca. Facultad de Ciencias Ambientales y Desarrollo*.
- Ortiz, G. M. G., Arroyo, J. H. R., & Alzate, F. S. (2022). Technical evaluation, treatment and management of sludge at PTAR El Salitre Phase II–Bogota, Colombia. *2022 Congreso Internacional de Innovación y Tendencias En Ingeniería (CONIITI)*, 1–3.
- Osorio Rivera, M. A., Carrillo Barahona, W. E., Negrete Costales, J. H., Loor Lalvay, X. A., & Riera Guachichulla, E. J. (2021). La calidad de las aguas residuales domésticas. <https://doi.org/10.23857/pc.v6i3.2360>
- Ospina López, F. A., Rodríguez González, A., & González Guzmán, J. M. (2017). Comparación de la reglamentación para el manejo de lodos provenientes de agua residual en Argentina, Chile y Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 8(1).
- Pabón Guerrero, S., Benítez, R., Sarria Villa, R. A., & Gallo, J. (2020). Water contamination by heavy metals, analysis methods and removal technologies. A review. *Entre Ciencia e Ingeniería*, 14, 9–18. <https://doi.org/10.31908/19098367.0001>
- Pacori Pacori, J. (2021). Diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales mediante el sistema de lodos activados en Villa Chullunquiani.
- Panhwar, A., Faryal, K., Kandhro, A., Bhutto, S., Rashid, U., Jalbani, N., Sultana, R., Solangi, A., Ahmed, M., Qaisar, S., Solangi, Z., Gorar, M., & Sargani, E. (2022a). Utilization of treated

- industrial wastewater and accumulation of heavy metals in soil and okra vegetable. *Environmental Challenges*, 6, 100447. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envc.2022.100447>
- Patel, J., & Desai, H. (2022). Removal of phenol by liquid-liquid extraction from pharmaceutical wastewater. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.12.435>
- Pérez García, N. (2021). Optimización de un filtro prensa para el tratamiento de lodos generados en la planta de tratamiento de la empresa Cueros y Diseños.
- Perez Zuñiga, M. E. (2016). Tratamiento de lodos residuales procedentes de plantas de tratamiento de aguas residuales mediante procesos electroquímicos para la disminución de metales pesados.
- Plan Nacional de Desarrollo. (2018). Programa Saneamiento de Vertimientos-SAVER. <https://www.minvivienda.gov.co/viceministerio-de-agua-y-saneamiento-basico/saneamiento-de-vertimientos>
- Presidencia, M. secretaria general de la presidencia; S. general de la. (2009). *Decreto 4 Reglamento para el manejo de lodos generados en plantas de tratamiento de aguas servidas*.
- Pulgarín Muñoz, C. E. (2023). Evaluación del proceso de estabilización de la materia orgánica en el proceso de co-digestión anaerobia de lodos residuales con residuos de alimentos.
- Pütz, P. (2008). Informe práctico analítica de laboratorio y sistema de control de proceso nutrientes fosfato.
- Ralph, S. (1975). Landfill Disposal of Liquid Sewage Sludge. *Journal of the Environmental Engineering División*, 101(1), 91–105. <https://doi.org/10.1061/JEEGAV.0000318>
- Ramalho, R. S., Beltrán, D. J., & De Lora Soria, F. (2021). Tratamiento de aguas residuales. *Reverte*.
- Ramírez Londoño, J. F. D. E. G. C. (2016). Análisis e implementación de un proceso de compostaje para la valorización de lodos provenientes de plantas de tratamiento de agua residual industrial. *Universidad Católica de Manizales*.
- Ramírez Ramírez, F., & Medina Arreola, G. (2021). Hacia una sustentabilidad social La importancia de la Cultura del Agua para la Sustentabilidad Social en la Ciudad de Durango.
- Real Academia de la lengua Española: *Diccionario de la lengua española* (23.6 en lí). (1995).
- Remis Rojas, R L & Espinoza Mendoza, L.G. (2011). El potencial de generación de energía eléctrica empleando biosólidos como fuente de materia prima: El caso de la ciudad de Ensenada, Baja California. *Simposio Iberoamericano de Ingeniería de; Residuos; Recuperación de Energía a Partir de Residuos.*, 5, 334–343.

- Reyes Araujo, D. Y., Mora Herrera, M. E., & Lugo, J. (2020). Estabilización por vermicomposteo de lodos residuales aplicados en la productividad de albahaca (*Ocimum basilicum* L.). *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 36(2), 371–381.
- Rigola Lapeña, M. (1989a). Tratamiento de aguas industriales: aguas de proceso y residuales. Marcombo. <https://books.google.es/books?id=fQcXUq9WFC8C>
- Rincón Carreño, L. N. (2019). Aprovechamiento de los lodos de planta de tratamiento de aguas residuales en empresa láctea, municipio de Cogua. *Fundación Universidad de América*.
- Rodier, J. (1990). Análisis de las aguas: aguas naturales, aguas residuales, agua de mar (pp. 269–272).
- Rodríguez, D. E. F., Rocha, J. C. C., Valencia, R. N. A., & Martínez, L. E. R. (2019). Evaluación de un sistema de centrifugación para el secado de lodos generados en el tratamiento de aguas residuales en la curtiembre El Escorpión del municipio de Villapinzón, Cundinamarca. *Revista Vínculos*, 16(2), 242–251.
- Rodríguez González, M. A., González Guzmán, J. M., & Camargo Mayorga, D. A. (2019). Avances En El Saneamiento Y La Gestión De Biosólidos En Colombia. *Revista Facultad de Ciencias Contables Económicas y Administrativas -FACCEA*, 9(2), 113–126. <https://doi.org/10.47847/faccea.v9n2a4>
- Román, Pilar; Martínez, María M; Pantoja, A. (2013). Manual de compostaje del agricultor. In *Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe*.
- Romero Rojas, J. A. (2004a). Tratamiento de aguas residuales: teoría y principios de diseño.
- Rongwong, W., & Sairiam, S. (2020a). A modeling study on the effects of pH and partial wetting on the removal of ammonia nitrogen from wastewater by membrane contactors. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(5), 104240. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104240>
- Rose, C., Parker, A., Jefferson, B., & Cartmell, E. (2015). The Characterization of Feces and Urine: A Review of the Literature to Inform Advanced Treatment Technology. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 45(17), 1827–1879. <https://doi.org/10.1080/10643389.2014.1000761>
- Safety, I. P. on C., & Chemicals, I.-O. P. for the S. M. of. (2013a). *Inorganic chromium (VI) compounds*. World Health Organization.
- Saktaywin, W., Tsuno, H., Nagare, H., & Soyama, T. (2006). Operation of a new sewage treatment process with technologies of excess sludge reduction and phosphorus recovery. *Water Science and Technology: A Journal of the International Association on Water Pollution Research*, 53(12), 217–227. <https://doi.org/10.2166/wst.2006.424>

- Saldaña Escorcía, R., & Castillo Gámez, J. K. (2021). Alternativas para la estabilización de lodos generados en estaciones depuradoras de aguas residuales desde un enfoque sistémico: una revisión. In *Revista de Investigación Agraria y Ambiental* (Vol. 13, Issue 1, pp. 175–194). <https://doi.org/10.22490/21456453.4504>
- Sánchez, J. E., Pastor, L., Doñate, S., & Claros, J. (2019a). Evaluación de la degradación de contaminantes emergentes en el proceso de digestión anaerobia de lodos de EDAR. *Novedar*, (June).
- Sánchez, J. G. C., Saltos, L. D. B., Obando, M. B. V., & Rizo, H. A. Z. (2020). Alternativas en la estabilización de lodos provenientes de plantas de tratamiento de aguas residuales. *Revista de Investigaciones En Energía, Medio Ambiente y Tecnología: RIEMAT ISSN: 2588-0721*, 5(1), 23–27.
- Santoya, J., Álvarez, R., Sanchez, A., & López, G. (2018). Caracterización de vermicompostas y su efecto en la germinación y crecimiento de *Capsicum chinense* Jacquin. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 5, 181. <https://doi.org/10.19136/era.a5n14.1465>
- Sdiri, W., Dabbou, S., Chehab, H., Selvaggini, R., Servili, M., Di Bella, G., & Mansour, H. Ben. (2020). Quality characteristics and chemical evaluation of Chemlali olive oil produced under dairy wastewater irrigation. *Agricultural Water Management*, 236, 106124. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106124>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2002). Norma Oficial Mexicana *NOM-004-SEMARNAT-2002, Protección ambiental. - Lodos y biosólidos. -Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final.*
- Severiche Sierra, C.A.& Barrios, L. A. (2013a). Manual de Métodos Analíticos para la Determinación de Parámetros Fisicoquímicos Básicos en Aguas.
- Sharon Mayli Freire Alegria. (2023). Evaluación del consumo de oxígeno por bacterias aeróbicas en aguas residuales de la planta de tratamiento de Ambato contaminadas con arsénico y cromo. Ambato, Ecuador.
- Siatou, A., Manali, A., & Gikas, P. (2020). Energy consumption and internal distribution in activated sludge wastewater treatment plants of Greece. *Water*, 12(4), 1204.
- Silva Thomsen, L. B., Anastasakis, K., & Biller, P. (2024). Hydrothermal liquefaction potential of wastewater treatment sludges: Effect of wastewater treatment plant and sludge nature on products distribution. *Fuel*, 355, 129525. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.129525>
- Skambraks, A.-K., Kjerstadius, H., Meier, M., Davidsson, Å., Wuttke, M., & Giese, T. (2017). Source separation sewage systems as a trend in urban wastewater management: Drivers for the implementation of pilot areas in Northern Europe. *Sustainable Cities and Society*, 28, 287–296. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scs.2016.09.013>

- Solano Ramírez, V., Centeno Mora, E., & Vidal Rivera, P. (2023). Cierre de ciclos de nutrientes y generación de energía por medio del tratamiento anaerobio de las aguas residuales ordinarias: Estudio de caso en Las Juntas de Abangares, Costa Rica. *Revista de Ciencias Ambientales*, 57(1).
- Solís, T. E. M., & Carranza, C. F. C. (2022). Importancia de la estabilización de lodos residuales para su valorización agrícola en el acondicionamiento del suelo. *Revista Del Instituto de Investigación de La Facultad de Minas, Metalurgia y Ciencias Geográficas*, 25(49), 103–114.
- Superservicios. (2020). Estudio sectorial de los servicios públicos domiciliarios de acueducto y alcantarillado 2019. 64.
- Takdastan, A., Rahmani, A. R., & Almasi, H. (2019). A review of the effects of ozonation process on biological sludge reduction. *Desalination and Water Treatment*, 162, 125–133. <https://doi.org/10.5004/dwt.2019.24324>
- Tejeda Benítez, L. P., & Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental. (2008). Aprovechamiento de lodos de agua residuales.
- Tito Sánchez, M. (2022). Influencia del vermicompostaje en la recuperación de lodos residuales de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Santa Clara-Lima 2021.
- Toro Martínez, C. A., & Goya Maza, D. A. (2023). Aislamiento de hongos filamentosos en Lodos primarios procedentes del tratamiento de aguas residuales de una planta procesadora de Atún.
- Torres Cortés, M. C. (2017). Propuesta para el aprovechamiento de los lodos generados en la PTAR de la empresa regional aguas del Tequendama (Vol. 2, Issue 1). *Fundación Universidad de América*.
- Torres, M. L., Veliz, E., García, L. A. F., & Lloréns, M. del C. E. (2010). Tratamiento de lodos. Una etapa necesaria dentro del proceso tecnológico. *Revista CENIC. Ciencias Químicas*, 41, 1–6.
- Torri, S. (2017). ¿Qué es un relleno sanitario? *Centro de Estudios y Desarrollo de Políticas Públicas*.
- Torrice Garcés, J. L. (2022). Tratamiento de agua residual ácida por tecnología de lodos de alta densidad en la Mina Barrick–Pierina.
- Trejos, Vélez Mariana; Agudelo, C. N. (2012). Propuesta para el aprovechamiento de lodos de la planta de tratamiento de aguas residuales de la empresa “comestibles la rosa” como alternativa para la generación de biosólidos. *Universidad Tecnológica de Pereira*.
- Truu, M., Truu, J., & Heinsoo, K. (2009). Changes in soil microbial community under willow coppice: The effect of irrigation with secondary-treated municipal wastewater. *Ecological Engineering*, 35(6), 1011–1020. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2008.08.010>
- United States Environmental Protection Agency. (1995). *Part 503 Implementation Guidance* (Vol. 120, Issue 11, p. 423).

- United States Environmental Protection Agency. (2021). *Composting at Home*.
- Universidad Autónoma de Occidente. (2011). II Conferencia internacional, gestión de residuos en América Latina. *Conferencia, 91*, 399–404.
- Valderrama Pedraza, M. L. (2013). Factibilidad de aprovechamiento de los lodos de la PTAR del municipio de Chinavita (Boyacá). *Universidad de Manizales*.
- Van Loosdrecht, M. C. M., Nielsen, P. H., López-Vázquez, C. M., Brdjanovic, D., López Vázquez, C. M., Gutiérrez, C. M., & Fall, C. (Eds.). (2019). *Métodos Experimentales para el Tratamiento de Aguas Residuales*. IWA Publishing. <https://doi.org/10.2166/9781780409252>
- Vargas-Pineda, O. I., Trujillo González, J. M., & Torres Mora, M. A. (2019). El compostaje, una alternativa para el aprovechamiento de residuos orgánicos en las centrales de abastecimiento. *Orinoquia, 23*(2), 123–129.
- Von Sperling, M., & Ambiental, U. F. de M. G. D. de E. S. e. (2014). Principios do tratamento biológico de águas resituárias. In *TA - TT - DESA/UFGM Belo Horizonte*. [https://doi.org/LK - https://worldcat.org/title/77543218](https://doi.org/LK-https://worldcat.org/title/77543218)
- Vozmediano Collado, M. T. (2021). *Tratamiento de Aguas Residuales Industriales*. Editorial Inclusión. <https://books.google.com.co/books?id=4BQ-EAAAQBAJ>
- Wang, J., Li, H., Liu, Y., Zhong, C., Luo, Z., & Li, D. (2020). Lysis characteristics and mechanism of excess sludge degraded by ozone and ultrasonic treatment. *Environmental Technology, 41*(2), 222–231. <https://doi.org/10.1080/09593330.2018.1494752>
- Wang, Y., Liu, H., Yang, X., & Wang, L. (2022). Aquatic toxicity and aquatic ecological risk assessment of wastewater-derived halogenated phenolic disinfection by products. *Science of The Total Environment, 809*, 151089. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151089>
- Weber, W. J. J., Guerra, R. A., & Feixas, J. B. (2021). *Control de la calidad del agua: Procesos fisicoquímicos*. Reverte.
- WHO and UNICEF. (2017a). Progress on drinking water, sanitation and hygiene: 2017 Update and SDG Baseline. World Health Organization, United Nations Children’s Fund. *World Health Organization*, 66. [https://www.unicef.org/publications/files/Progress\\_on\\_Drinking\\_Water\\_Sanitation\\_and\\_Hygiene\\_2017.pdf](https://www.unicef.org/publications/files/Progress_on_Drinking_Water_Sanitation_and_Hygiene_2017.pdf)
- Xie, D., Gao, M., Yang, M., Xu, M., Meng, J., Wu, C., Wang, Q., Liu, S., & Sun, X. (2021a). Composting—a solution of eliminating a nitrite-rich wastewater by reusing it as a moisture conditioning agent. *Chemosphere, 284*, 131365. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131365>





- Yang, W., Cai, C., Guo, Y., Wu, H., Guo, Y., & Dai, X. (2022). Diversity and fate of human pathogenic bacteria, fungi, protozoa, and viruses in full-scale sludge treatment plants. *Journal of Cleaner Production*, 380, 134990. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134990>
- Yaser, A., Lamaming, J., Suali, E., Rajin, M., Saalah, S., Kamin, Z., Safie, N. N., Aji, N. A. S., & Wid, N. (2022). Composting and Anaerobic Digestion of Food Waste and Sewage Sludge for Campus Sustainability: A Review. *International Journal of Chemical Engineering*, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/6455889>
- Zakharov, Y., & Bondareva, L. (2015). Simulation of Domestic and Industrial Wastewater Disposal in Flooded Mine Workings. *Procedia Engineering*, 117, 389–396. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.183>
- Zat, T., Bandeira, M., Sattler, N., Segadães, A. M., Cruz, R. C. D., Mohamad, G., & Rodríguez, E. D. (2021). Potential re-use of sewage sludge as a raw material in the production of eco-friendly bricks. *Journal of Environmental Management*, 297, 113238. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113238>