



**Modelo circular para aprovechamiento de lodos procedentes de plantas de tratamiento de aguas
residuales industriales**

Manuela Castaño Agudelo

Trabajo de grado presentado para optar al título de Ingeniería Sanitaria

Modalidad de Práctica

Trabajo de Grado

Asesor

Danny Waldir Ibarra Vega, Doctor (PhD) en ingeniería

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Ingeniería Sanitaria

Medellín, Antioquia, Colombia

2025

Cita	(Castaño Agudelo M, 2025) [1]
Referencia	[1] Castaño Agudelo M. (2025), “Modelo circular para aprovechamiento de lodos procedentes de plantas de tratamiento de aguas residuales industriales”, trabajo de grado, Ingeniería Sanitaria, Universidad de Antioquia. Medellín, Antioquia, Colombia, 2025.
Estilo IEEE (2020)	



Centro de Documentación Ingeniería (CENDOI)

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Dedicatoria

Un ser bajo su convicción,
lleva consigo los matices y sombras del entorno,
que entrelazados con inspiración,
lo visten para un camino sin retorno,
pero inequívoco de la libertad.

Agradecimientos

Agradezco a mi familia por cultivar su amor en todos los momentos de mi vida, y al eterno por
mostrarme que siempre hay un camino.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	2
ABSTRACT	3
I. INTRODUCCIÓN	4
II. OBJETIVOS.....	6
A. Objetivo general	6
B. Objetivos específicos.....	6
III. MARCO TEÓRICO	7
IV. METODOLOGÍA	10
V. ANÁLISIS DE RESULTADOS	13
A. Gestión de lodos industriales.....	13
1) Lodos residuales industriales.....	13
2) Consideraciones para la gestión de lodos industriales	14
3) Transformación de lodos	16
a) Caracterización	16
b) Composición estándar de lodos Industriales y otros	20
c) Análisis de regulaciones	22
d) Estimación de costos y cadena logística: Handbook estimating sludge management.....	24
e) Estabilización de materia orgánica	25
Digestión	25
Otros procesos de estabilización de lodos	26
f) Tratamientos de reducción de agua	27
Espesamiento.....	30
Deshidratación.....	30
Secado térmico	31
4) Impactos ambientales de lodos industriales	32
5) Aplicaciones para lodos industriales	37
a) Específicas	37
Sector textil.....	37
Aplicaciones como enmienda de suelo	37
Aplicaciones en fabricación de ladrillos	39
Sector curtiembre	39
Aplicaciones como Enmienda de suelo	39
Sector alimentario	40
Aplicaciones como enmienda de suelos	40

Aplicaciones en fabricación de ladrillos	40
Sector papelero	41
Aplicaciones en Enmienda de suelos.....	41
Aplicaciones en fabricación de Zeolitas sintéticas	41
Estrategias de estabilización o descontaminación de lodos industriales.	42
b) Biosólidos	43
Clases de biosólidos	44
Tipos de biosólidos	44
c) Otras alternativas	46
Recuperación de materiales	46
Insumos	46
Cobertura protectora	47
B. Biofactoría o biofábrica	48
C. Modelo conceptual	49
D. Guía para empresas.....	50
VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	51
REFERENCIAS	53
ANEXOS.....	66

LISTA DE TABLAS

TABLA I PROPIEDADES FÍSICAS DEL LODO.....	17
TABLA II PROPIEDADES QUÍMICAS DEL LODO	18
TABLA III PROPIEDADES MICROBIOLÓGICAS DEL LODO.....	19
TABLA IV PROPIEDADES DEL MOVIMIENTO DEL LODO.....	19
TABLA V PROPIEDADES CRÍTICAS EN UN LODO.....	20
TABLA VI RESULTADOS ESTANDAR EN ALGUNAS CARACTERIZACIONES DE LODOS	21
TABLA VII RESUMEN DE PORCENTAJES DE AGUA REDUCIDOS EN DIFERENTES PROCESOS.....	31
TABLA VIII IMPACTOS AMBIENTALES EN LAS DIFERENTES MATRICES.....	35
TABLA IX APLICACIONES EN SUELO Y CLASE DE BIOSÓLIDOS	45

LISTA DE FIGURAS

Fig I.Esquema de Metodología	10
Fig II.Tipos de lodo.....	13
Fig III.Foto de lodo fresco en el laboratorio de procesos biológicos de la Universidad de Antioquia.....	28
Fig IV.Foto de lodo fresco en el laboratorio de procesos biológicos de la Universidad de Antioquia	29
Fig V.Esquema de flóculo con los tres tipos de agua	30
Fig VI.Modelo circular para aprovechamiento de lodos industriales	50
Fig VII.Esquema visual para empresas.....	51

SIGLAS, ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

PTAR: Planta de Tratamiento de Aguas Residuales

PTARI: Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Industriales

IWWTP: *Industrial Wastewater Treatment Plant* (Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Industriales, en inglés)

ARnD: Aguas Residuales No Domésticas

EDAR: Estación Depuradora de Aguas Residuales

PNIR: Plan Nacional Integrado de Residuos

CRETIB: Corrosivo, Reactivo, Explosivo, Tóxico ambiental, Inflamable y Biológico-infeccioso

EC: Economía Circular

BOL: *Beginning of Life*

EOL: *End of Life*

EPA: *Environmental Protection Agency* (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos)

CFR: Código de Regulaciones Federales (*Code of Federal Regulations*)

PFAS: Sustancias Perfluoroalquiladas y Polifluoroalquiladas

MGD: Millones de Galones por Día (*Million Gallons per Day*)

MO: Materia Orgánica

DBO₅: Demanda Bioquímica de Oxígeno a 5 días

DQO: Demanda Química de Oxígeno

VFA: Ácidos Grasos Volátiles (*Volatile Fatty Acids*)

FOG: Grasas y Aceites (*Fats, Oils, and Grease*)

SV: Sólidos Volátiles

SS: Sólidos Suspendidos

ST: Sólidos Totales

SF: Sólidos Fijos

CaO: Óxido de Calcio (cal viva)

PCBs: Bifenilos Policlorados

PAHs: Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos

EOCs: Contaminantes Orgánicos Emergentes (*Emerging Organic Contaminants*)

EDS: Sustancias Disruptoras Endocrinas (*Endocrine Disrupting Substances*)

RAM: Resistencia Antimicrobiana

AOX: Compuestos Orgánicos Halogenados Adsorbibles

LAS: Surfactantes Lineales Alquil Benceno Sulfonados

DEHP: Di(2-etilhexil) ftalato

NP/NPE: Nonilfenol y Etoxilatos de Nonilfenol

PCDD/F: Dioxinas y Furanos Policlorados

PFCP: Compuestos Perfluorados Contaminantes

MITECO: Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (España)

NCh: Norma Chilena

NOM: Norma Oficial Mexicana

SEMARNAT: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (México)

LGEEPA: Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (México)

NTE INEN: Norma Técnica Ecuatoriana - Instituto Ecuatoriano de Normalización

FAO: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura

EDTA: Ácido Etilendiaminotetraacético

CMC: Carboximetilcelulosa

C/N: Relación Carbono/Nitrógeno

C/P: Relación Carbono/Fósforo

ANAMMOX: Anaerobic Ammonium Oxidation (Oxidación Anaeróbica de Amonio)

RESUMEN

La gestión de los lodos industriales generados en las plantas de tratamiento de aguas residuales industriales (PTARI) presenta retos por su alto volumen, composición variable y falta de normativa específica, a diferencia de los domésticos.

Este trabajo propone un modelo conceptual de economía circular para transformar estos residuos en recursos útiles, minimizando su impacto ambiental y promoviendo su aprovechamiento sostenible. El modelo parte de la caracterización física, química, microbiológica y crítica, para determinar su composición y viabilidad de manejo.

Luego indica revisar en la normativa del país si el residuo cataloga como peligroso, si lo es queda por fuera de este modelo. Por el contrario, si no son peligrosos, y cumple con la normativa de biosólidos, como el caso de los lodos alimentarios, pueden tratarse con tecnologías convencionales. Para lodos no peligrosos de industrias textiles, curtiembre, alimentaria y papelera, hay aplicaciones específicas y generales. La gestión de los lodos incluye procesos técnicos como estabilización, reducción de agua y cálculo de costos mediante el Handbook de la EPA.

Las aplicaciones evaluadas incluyen enmiendas de suelos, fabricación de ladrillos, coberturas de relaves mineros, recuperación de metales, proteínas-lípidos e insumos para productos. Adicionalmente se detalló los impactos ambientales en cada matriz.

Este modelo busca no solo mejorar la gestión de lodos industriales, si no también fomentar políticas, normativa especializada de lodos industriales, investigación, y todo lo que impulse una gestión segura, y la reincorporación al ciclo productivo del lodo, bajo los principios de la economía circular.

Palabras clave: lodos industriales, plantas de tratamiento de aguas residuales industriales (PTARI), aplicaciones de lodos, gestión, manejo, caracterización, tratamiento, regulaciones, economía circular, valorización, reincorporación productiva, impactos ambientales, enmienda de suelos, elaboración de ladrillos, sectores industriales: textil, curtiembre, alimentario, papelerero.

ABSTRACT

The management of industrial sludge generated in industrial wastewater treatment plants (WWTPs) presents challenges due to their high volume, variable composition, and lack of specific regulations, unlike domestic waste.

This paper proposes a conceptual circular economy model to transform this waste into useful resources, minimizing its environmental impact and promoting its sustainable use. The model is based on physical, chemical, microbiological, and critical characterization to determine its composition and management feasibility.

It then indicates checking the country's regulations to see if the waste is classified as hazardous; if so, it is excluded from this model. Conversely, if the waste is not hazardous and complies with biosolids regulations, as is the case with food sludge, it can be treated with conventional technologies.

For non-hazardous sludge from the textile, tanning, food, and paper industries, there are specific and general applications. Sludge management includes technical processes such as stabilization, water reduction, and cost calculations using the EPA Handbook. The applications evaluated include soil amendments, brick manufacturing, mine tailings capping, metal recovery, protein-lipid recovery, and product inputs. The environmental impacts of each matrix were also detailed.

This model seeks not only to improve industrial sludge management, but also to promote policies, specialized industrial sludge regulations, research, and everything that promotes safe management and the reintegration of sludge into the production cycle, under the principles of the circular economy.

Keywords: industrial sludge, industrial wastewater treatment plants (IWWTP), sludge applications, management, handling, characterization, treatment, regulations, circular economy, valorization, productive reincorporation, environmental impacts, soil amendment, brick making, industrial sectors: textile, tanning, food, paper.

I. INTRODUCCIÓN

La gestión de los lodos industriales o semisólidos es un desafío constante para las industrias, debido a que las prácticas tradicionales de gestión de lodos, como el vertido en rellenos, incineración, cada vez se restringen más por los grandes volúmenes generados y los altos costos que representa su gestión [1]. La presión ambiental, y la opinión pública han generado normas regulatorias cada vez más estrictas, lo que dificulta la disposición final [1].

Diariamente, se generan grandes cantidades de lodos residuales, como subproducto del tratamiento de aguas residuales, que han incrementado con el crecimiento poblacional y tecnológico [2]. Por consiguiente, es determinante un tratamiento de lodos enfocado a su alto contenido de agua y volumen, lo que abre las puertas a nuevas tecnologías y métodos para reducir las dimensiones del lodo [3].

Los lodos industriales dependiendo su procedencia, podrían ser peligrosos [2], teniendo esto en cuenta, el manejo de estos semisólidos puede representar un riesgo ambiental y de salud pública, si se realizan disposiciones sin previo tratamiento [4].

Dependiendo de cada país, es necesario cumplir con ciertas exigencias para el tratamiento y gestión de los lodos residuales, como la estabilización, clasificación, y la obtención de permisos sanitarios, que regulen su disposición o reúso en diferentes sectores, como la normativa costarricense [4].

El crecimiento económico, la generación de residuos, el consumo de agua y electricidad, tienen una relación bidireccional, además el consumismo y la urbanización, aumentaron significativamente la generación de residuos [5].

Se estima que para el 2050 solo un 33% de los residuos sean gestionados con responsabilidad ambiental [5].

El aprovechamiento de los lodos residuales es un reto no solo por su volumen, si no por su composición, porque podría limitar las alternativas de reúso, un ejemplo problemático de esto, es el contenido de metales pesados [6].

Un estudio en la cuenca del río Segura, España, cuantificó que la producción de lodos en empresas agroalimentarias está entre 12,895 y 22,520 toneladas anuales ó 61,7 ton/día generando costos promedios de 350.000 euros anuales [7]. Por lo tanto, es vital tomar enfoques en la recuperación de residuos y no en la disposición final; incluso con un tratamiento adecuado, el lodo puede

convertirse en una fuente valiosa [2]. Al mismo tiempo, este enfoque permite contribuir a la economía circular sostenible [2].

Este estudio tiene bases para una gestión más eficiente de los lodos industriales, mediante la estructuración de un modelo aplicable a distintos contextos productivos.

El modelo surge como una respuesta a los desafíos actuales de los lodos residuales, asociados a las características fisicoquímicas de estos (alto contenido de agua, baja capacidad de deshidratación y regulaciones estrictas) [8]. Este apunta a estrategias que permitan aplicaciones comerciales, y contribuyan hacia la transición de una economía más sostenible [9].

El modelo busca reducir impactos ambientales en las diferentes matrices, y los riesgos para la salud pública, impulsando investigaciones y desarrollo en el área de la biotecnología, química ambiental y economía circular. Asimismo, busca inspirar nuevas políticas para los lodos industriales, como regulaciones que promuevan la reutilización y la valorización de residuos, y a su vez, una reformulación más completa de límites para lodos residuales industriales, con el fin de proteger la población y el ambiente.

El modelo fomenta nuevas formas de ordenamiento territorial, como parques industriales, donde los residuos de una industria se convierten en insumos para otra; y otras ideas como se plantea en la Estrategia Nacional de Economía Circular de Colombia [10]

En este contexto, el modelo se centra en el desarrollo de un marco conceptual para el aprovechamiento de los lodos residuales industriales, en base a los principios de la economía circular.

El modelo representa de forma generalizada y teórica el proceso de gestión y las posibilidades de aprovechamiento. Está construido a partir de revisión y recopilación de información, análisis de sectores clave como el textil, alimentario, curtiembre y papelería; donde se evaluó aplicaciones, alternativas de reúso, generación de productos y elaboración de insumos útiles para otros sectores industriales.

II. OBJETIVOS

A. Objetivo general

Establecer un modelo conceptual de economía circular para el manejo y aprovechamiento de lodos de aguas residuales industriales, a partir de la revisión de tecnologías de tratamiento y su potencial de reutilización.

B. Objetivos específicos

- Realizar una revisión bibliográfica sobre las tecnologías de tratamiento y estrategias de manejo de lodos residuales en diferentes tipos de plantas de producción.
- Evaluar el potencial de circularidad de los lodos a través del análisis de sus propiedades fisicoquímicas, su impacto ambiental y su viabilidad en procesos productivos.
- Diseñar un modelo conceptual de aprovechamiento de lodos basado en principios de economía circular y sostenibilidad, considerando criterios técnicos y ambientales.

III. MARCO TEÓRICO

A nivel mundial, el tratamiento de aguas residuales tanto industriales como domésticas, es un proceso esencial para proteger la salud pública y el medio ambiente [11]. Este debe cumplir con normativas, que aseguren una calidad adecuada del agua para su disposición o reutilización [11]. Las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR), son las encargadas de remover contaminantes del agua, y permitir su vertimiento seguro o su aprovechamiento en otras actividades [11]. No obstante, este proceso también genera subproductos como los lodos residuales, espumas y arenas [11].

Gran parte del conocimiento disponible sobre los lodos residuales se basa en estudios de aguas urbanas. En contraste, los lodos varían según su origen, edad, tipo de tratamiento y fuente generadora [11]. En este sentido, los lodos industriales, presentan características específicas que exigen tratamientos más adaptados, al igual que ocurre con el agua residual industrial frente a la doméstica.

La composición de los lodos varía según las características físicas, químicas y microbiológicas; tienen una composición mayoritariamente acuosa, y se generan en grandes volúmenes, con alrededor 95% de agua, y su contenido varía dependiendo de la industria, los procesos de tratamiento implementados, y el tipo de lodo [11].

Entre los componentes presentes en los lodos, se encuentran materiales en suspensión o disueltos, nutrientes como nitrógeno (N), fósforo (P), calcio (Ca), magnesio (Mg), metales pesados como cromo (Cr), plomo (Pb), micronutrientes, patógenos y materia orgánica [12] .

Para concretamente saber el contenido de un lodo y su calidad, se realiza una caracterización, para establecer una categoría y posibles usos según sus componentes [11] .

Cabe resaltar que, dependiendo del país, hay regulaciones para el uso y manejo, que pueden incluir infraestructuras costosas [11]. Por ejemplo, en España, el Plan Nacional Integrado de Residuos (PNIR), establece directrices para la gestión de residuos industriales [13], mientras que en Colombia el decreto 1287 de 2014, regula el uso de los biosólidos generados en las plantas de tratamiento de aguas residuales [14]; asimismo Chile, cuenta con el Decreto 4, específico para la disposición y manejo de lodos y biosólidos [15].

El manejo de lodos, debe ser organizado y supervisado mediante normativas que regulen su clasificación, niveles permitidos de contaminantes, procedimientos, transporte almacenamiento tratamiento y disposición, con el fin de garantizar la seguridad a la salud pública, y el ambiente, al mismo tiempo de sancionar a quienes no cumplan la norma [11].

El lodo se clasifica según sus componentes;

el Lodo Primario está compuesto por los sólidos sedimentables, que se encuentran en las aguas residuales sin tratar [16].

El Lodo Secundario, incluye sólidos biológicos y otros sólidos sedimentables adicionales [16].

Finalmente, el lodo terciario es generado en procesos avanzados de tratamiento, además podrían contener virus, metales pesados fósforo o nitrógeno [16].

Siendo la composición, un factor determinante para el uso del lodo, entra un concepto vital: la valorización de residuos. Esta pretende convertir un desecho, en un producto nuevamente útil, como compuestos químicos, materiales o fuentes de energía [17]. A su vez, un ejemplo de valorización, se da en la reutilización de los nutrientes provenientes de los lodos de una industria alimentaria, como la láctea, destacando las potenciales ganancias [18].

Ahora bien, para transformar el lodo en una materia nuevamente útil, se deben resolver tres problemas principales del lodo: mal olor, peligrosidad y exceso de agua [19]. Para lo anterior, se debe realizar exitosamente procesos como la estabilización, para eliminar el olor y patógenos; el espesamiento para concentrar el lodo y separarlo del agua, y por último la deshidratación que extrae el agua [19].

Finalmente, estos procesos buscan hacer más manejable el lodo y menos costosa la disposición final [19].

En este contexto de la transformación del lodo, la economía circular, emerge como un modelo innovador para hacer frente a la creciente demanda de materias primas, además de los desafíos asociados con el desarrollo económico y el crecimiento de la población [10].

Este modelo promueve una transformación de los patrones de producción y consumo, pasando de un modelo lineal de “producir, usar y desechar”, a un modelo que busca reducir los flujos de materiales, reincorporar los productos al ciclo productivo, y maximizar su vida útil [10].

La economía circular fomenta el aprovechamiento de los recursos, la reutilización de los residuos y la minimización del impacto ambiental; conceptos que se alinean perfectamente con las estrategias de valorización de residuos industriales [10], como los lodos generados en las plantas de tratamiento de aguas industriales.

Aunque existen varios estudios y propuestas sobre el tratamiento de lodos en el contexto del desarrollo sostenible, este marco enfrenta dificultades, especialmente en países en vía de desarrollo

[20]. Estas dificultades se deben a la necesidad de realizar cambios significativos en las estructuras económicas y sociales, lo que complica su adopción [20]. A pesar de prometer respeto por los recursos y un cambio de mentalidad, el desarrollo sostenible carece de un enfoque tecnificado en el tratamiento del producto [20]. En cambio, la economía circular (EC), se centra más en el producto, la reducción de residuos y el reciclaje, utilizando un enfoque tecnificado, orientado al negocio y el empleo [20].

Ahora bien, la EC está limitada por la vida útil de los productos, (BOL) (Beginning of Life) y (EOL)(Ending of Life); simultáneamente, presenta carencias en el componente social y el enfoque al consumidor [20].

En este contexto, aplicar principios de EC en la gestión de estos residuos industriales, se presenta como una solución, para llenar estos vacíos en vías tecnificadas que presenta el desarrollo sostenible; mejorando el proceso de gestión de lodos, y reduciendo el impacto ambiental asociado a su disposición final [21].

Además, la economía circular es un enfoque emergente que puede generar resultados diversos, según factores como las regulaciones locales, las capacidades tecnológicas disponibles, y las condiciones socioeconómicas de cada región [21].

Por lo tanto, es esencial desarrollar modelos que consideren distintos escenarios, y adapten las soluciones a las particularidades de cada contexto, asegurando que los principios de circularidad como reutilización, reciclaje y regeneración, se implementen de manera efectiva en función de los recursos y desafíos específicos en cada área [21].

IV. METODOLOGÍA

Metodología

Fase 1

Revisión bibliográfica y normativa

- Revisión en bases científicas, documentos gubernamentales e institucionales.
- Clasificación de aplicaciones por sectores industriales (textil, papelería, curtiembre, alimentario).

Fase 2

Evaluación del potencial de circularidad

- Caracterización
- Revisión normativa
- Estimación de costos con Handbook EPA.
- Impactos ambientales en suelo, agua, aire, ecosistema y salud pública.
- Identificación de aplicaciones: compostaje, ladrillos, otros usos.

Fase 3

Diseño del modelo conceptual

- Síntesis de información y elaboración de esquemas.

Modelo conceptual



Fig I. Esquema de Metodología

Fase 1: Revisión bibliográfica y normativa.

En esta primera etapa, se desarrolló una revisión de literatura científica, normativa-técnica y documentos institucionales, orientada a identificar las tecnologías de tratamiento y estrategias actuales de manejo de lodos residuales industriales.

Se consultaron en bases científicas como ScienceDirect y Reaserch gate, así como documentos oficiales de organismos internacionales y gubernamentales de diferentes países, repositorios de universidades, trabajos de grado, propuestas o normativa vigente.

La información relacionada a las aplicaciones o usos, fue clasificada por sectores productivos (industrias textiles, papeleras, alimentarias, curtiembre). La recopilación fue organizada mediante Google drive y Zotero para las referencias.

Esta etapa permitió sentar las bases para comprender la variedad de enfoques y limitaciones existentes en la gestión de lodos industriales.

Fase 2: Evaluación del potencial de circularidad de los lodos.

En la segunda fase, se analizó la viabilidad técnica, ambiental y normativa del aprovechamiento de los lodos industriales, desde un enfoque de economía circular.

Para ello, se realizó un análisis detallado de la composición de los lodos industriales: físico, químico, microbiológico, fluidodinámico y crítico; con el fin de ilustrar una caracterización más especializada en compuestos industriales.

A partir de la caracterización, se analizaron diferentes normativas relacionadas con los lodos, como normativas de residuos no peligrosos, residuos peligrosos, biosólidos, lodos, y compostaje, de países como Colombia, Estados Unidos, España, México y Chile.

Teniendo una visión clara, se sugiere evaluar los costos aproximados de la gestión completa de los lodos, es decir el proceso de inversión, operación y mantenimiento, mediante el HandBook estimating sludge Management costs, con el fin de seleccionar la cadena de tratamiento al alcance de la industria.

Luego se describió el proceso técnico de estabilización y reducción de agua. Después se identificaron los principales impactos ambientales sobre las matrices del suelo, agua, aire, ecosistema y salud pública, asociados al incorrecto manejo de lodos industriales.

Finalmente, por sector industrial textil, paplero, curtiembre y alimentario; se clasificaron las aplicaciones o usos en enmienda de suelo, principalmente como compostaje, y construcción de ladrillos.

Adicionalmente a manera generalizada, también se describieron algunos procesos que podrían ayudar a descontaminar o mejorar la calidad los lodos industriales, y otras aplicaciones generales de lodos residuales.

Fase 3: diseño del modelo conceptual de economía circular.

La tercera fase, consistió en la formulación de un modelo conceptual de gestión y aprovechamiento de los lodos industriales no peligrosos, fundamentado en los principios de la economía circular.

A partir de la información recolectada en las fases anteriores, se sintetizaron los criterios técnicos y ambientales para la gestión del lodo, teniendo en cuenta las características del lodo, viabilidad tecnológica y normativa vigente.

El modelo provee el contexto y los problemas asociados de los lodos industriales, la generación, transformación, usos y estrategias circulares que permiten reintegrar el lodo al ciclo productivo. Además, el modelo integra un esquema que resume el proceso de gestión de lodos industriales y facilita la toma de decisiones por parte de las industrias en los diferentes escenarios.

V. ANÁLISIS DE RESULTADOS

A. Gestión de lodos industriales

1) Lodos residuales industriales

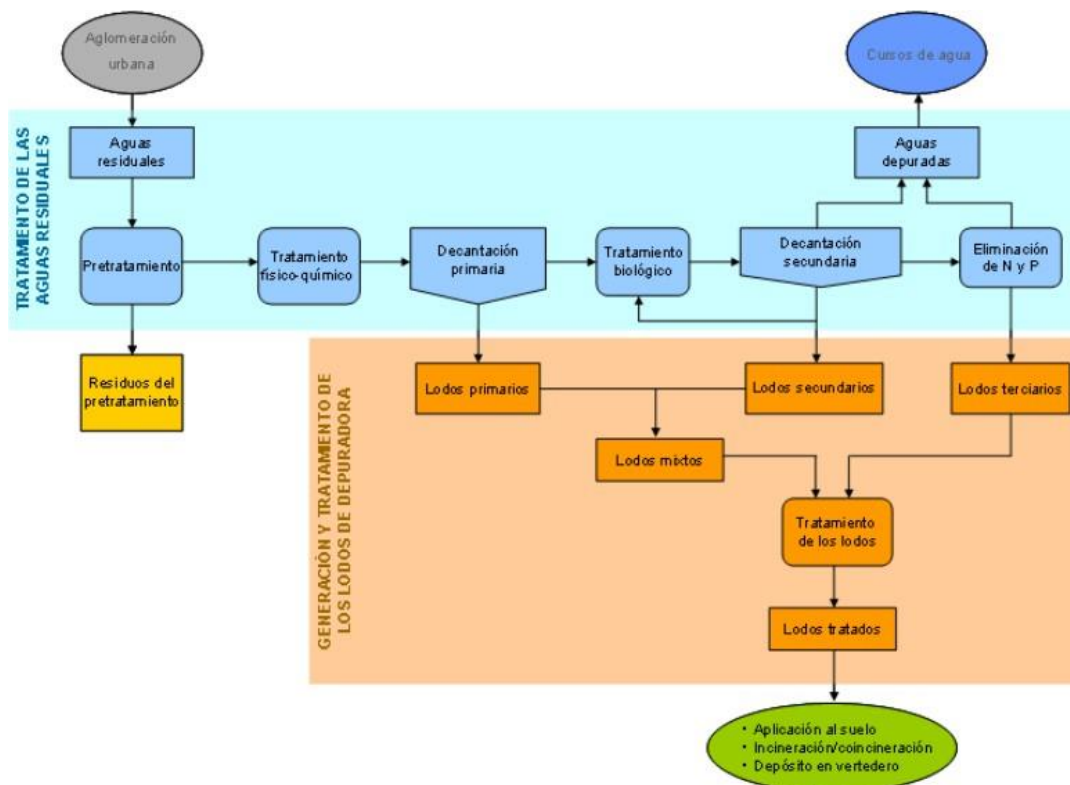


Fig II. Tipos de lodo

Nota.Fuente: [12]

Lodo primario: este lodo se forma por sedimentación de los sólidos suspendidos en el agua residual en la fase inicial del tratamiento[22].

Lodo secundario o Biológico: Se genera cuando microorganismos descomponen la materia orgánica disuelta en el agua durante el tratamiento biológico, en una planta de tratamiento de aguas residuales industriales (PTARI) o en inglés (IWWTP) [22].

Lodos mixtos: son una mezcla de los lodos primarios y secundarios [22].

En el estudio de los lodos residuales, es fundamental entender los términos PTAR (planta de tratamiento de aguas residuales) y EDAR (estación depuradora de aguas residuales), ya que gran parte de la información técnica sobre lodos se origina en el contexto de estas instalaciones.

Aunque los acrónimos varían según la región PTAR en América Y EDAR en Europa, ambos se refieren a instalaciones destinadas a reducir la carga contaminante de las aguas municipales, que incluyen mezclas de aguas domésticas, industriales pretratadas, comerciales y de escorrentía [23], [24], [25].

Estas aclaraciones ayudan a contextualizar el origen de los lodos residuales y explican porque la mayoría de los estudios se enfocan en los lodos generados en entornos municipales. No obstante, cuando se trata de lodos industriales, derivados de plantas de tratamiento de agua especializadas o industriales PTARI o inglés IWWTP, es necesario adoptar enfoques más específicos, ya que los residuos pueden contener componentes particulares según el tipo de industria [11]. Al igual que las PTAR las PTARI, también generan subproductos como los lodos industriales, espumas, arenas y otros , cuyas características varían según el tipo de industria [11].

Los lodos representan uno de los productos más relevantes de este tratamiento, debido a que tiene una composición mayoritariamente acuosa, y se generan en grandes volúmenes, con alrededor del 95% de agua [11].

Los lodos generalmente se componen de materiales en suspensión o disueltos, nutrientes como nitrógeno(N), fósforo(P), calcio (Ca), magnesio (Mg), metales pesados como cromo (Cr), plomo (Pb), micronutrientes, patógenos y materia orgánica [12]. Así como características generales fisicoquímicas y fluidodinámicas (como fluye el lodo o como se mueve) [26].

2) Consideraciones para la gestión de lodos industriales

Se resalta de nuevo, que gran parte de la información y normatividad disponible para lodos, está enfocada en lodos residuales de origen doméstico [11], ahora bien, este trabajo recopila datos para tratar de gestionar adecuadamente los lodos industriales con la información existente.

Los lodos provenientes de aguas residuales industriales, podrían tener una amplia variedad de contaminantes derivados de los procesos productivos [27], [28], muchos de los cuales no están presentes en los lodos domésticos convencionales.

Por este motivo, es fundamental que cada industria evalúe cuidadosamente la naturaleza de los compuestos presentes en sus lodos, antes de definir el modelo de gestión que puede aplicar.

Dependiendo del tipo de industria y de los insumos utilizados, hay casos como el de algunas industrias alimentarias, donde los lodos generados presentan una composición similar a la de los lodos domésticos, según el ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico de España[12], [29] .

En general los lodos alimentarios no deberían presentar características de peligrosidad, porque proceden del procesamiento de alimentos [30].

En esta situación, se plantea la posibilidad de acogerse al modelo convencional de tratamiento de lodos domésticos utilizando tecnologías ya establecidas y tratamientos compatibles, si se garantiza la no peligrosidad de los lodos industriales similares a los domésticos [12],[26],[31],[32],[33],[34],[35],[36].

No obstante, incluso en estos casos, es necesario tener especial precaución si se detecta la presencia de sustancias no contempladas explícitamente en la normativa de biosólidos o lodos residuales vigentes locales, ya que en tal escenario no es viable aplicar tratamientos convencionales de lodos residuales.

Además, las aplicaciones de los lodos similares a los domésticos como los provenientes de la industria alimentaria, también deben realizarse con precaución, y respaldarse siempre en estudios específicos que justifiquen su uso, ya que, en concentraciones inadecuadas, estos podrían presentar efectos tóxicos [37].

Por otro lado, si se identifican sustancias peligrosas en los lodos como las presentes en el decreto 4741 de 2005 de Colombia, CRETIB de México o la normativa de residuos peligrosos local, la industria deberá acogerse a la normativa nacional correspondiente par residuos peligrosos, como por ejemplo el 40 CFR parte 261 en estados unidos [38],[39],[40].

En definitiva, cada industria debe evaluar detalladamente si sus lodos contienen o no sustancias peligrosas, con el fin de definir el modelo de gestión que puede aplicar; si el convencional de lodos residuales, o la ruta de residuos peligrosos (la cual no es objeto de este modelo).

Si una industria desea acogerse un esquema similar al de los lodos domésticos debe asegurar que la composición sea equivalente a los lodos urbanos, es decir que todos los componentes que tenga el lodo aparezcan regulados en la normativa de biosólidos del respectivo país, y que no existan contaminantes peligrosos según su normativa local, o en su defecto, eliminar o sustituir el uso de sustancia problemáticas en sus procesos productivos. De lo contrario, se verá limitada a aplicar únicamente la normativa de residuos peligrosos respectiva.

Otra forma de gestión para lodos no peligrosos, son aplicaciones para diferentes lodos industriales provenientes de los sectores más relevantes como la textil, la papelera, curtiembre y alimentaria, que, implementados bajo ciertas condiciones, han mostrado resultados positivos y se detallarán más adelante.

Nota: este documento recopila normatividad de diferentes países con un fin informativo. Se aclara que todos los procedimientos de gestión que se realicen deben estar sujetos a la normativa nacional vigente de cada país.

3) *Transformación de lodos*

a) *Caracterización*

Es el proceso mediante el cual se recoge información sobre la composición de los lodos, con el objetivo de determinar el tratamiento más adecuado [11], [26]. Para ello, se deben realizar ensayos o pruebas de laboratorio, que permiten medir una serie de parámetros clave para determinar la naturaleza del lodo [26].

Además, se incorporan parámetros de algunas normas de residuos peligrosos, con el fin de constatar que efectivamente el lodo es NO peligroso[41]. También se sugieren combinar criterios químicos y eco toxicológicos para la tratar de tener una caracterización más integral de los lodos industriales [27]

TABLA I
PROPIEDADES FÍSICAS DEL LODO

Características físicas	
Parámetro	Descripción
Sólidos suspendidos (SS)	Partículas no disueltas en el agua
Sólidos totales (ST)	Suma de sólidos suspendidos y disueltos
Sólidos volátiles (SV)	Principalmente materia orgánica (MO)
Sólidos fijos (SF)	Fracción inorgánica o cenizas
Temperaturas de análisis térmico	105°C: Evaporación de agua 185°C: Pérdida de agua de cristalización 250°C: Eliminación de celulosa 550°C: Combustión de materia orgánica 900°C: Descomposición de carbonatos
Fibras	Contenido de fibras

Nota.Fuente: [11],[26],[35]

TABLA II
PROPIEDADES QUÍMICAS DEL LODO

Características químicas	
Parámetro	Descripción
Elementos químicos	P, N, K, C y metales pesados (Pb, Cd, Cr, Hg, As, Ni, Zn, Cu)
Microcontaminantes inorgánicos	Metales traza no regulados comúnmente (Sb, Se, Mo, Ba)
Alcalinidad	Capacidad para neutralizar ácidos (mg/LCaCO ₃)
Ácidos grasos volátiles (VFA)	Ácido acético, propiónico y butírico.
Grasas y aceites (FOG)	Contenido de lípidos y aceites
Salinidad/Cloruros (Cl ⁻)	Evaluación de sales totales y concentración de cloruros
DBO ₅	Demanda Bioquímica de Oxígeno en 5 días a 20°C (materia orgánica biodegradable)
DQO	Demanda Química de Oxígeno (materia orgánica total)
Relaciones estequiométricas	C/N y C/P: equilibrio nutricional y biodegradabilidad
Caracterización de olores	Gases como H ₂ S, NH ₃ , mercaptanos

Nota.Fuente: [11],[26],[35],[42],[43],[44],[45].

TABLA III
PROPIEDADES MICROBIOLÓGICAS DEL LODO

Características microbiológicas	
Parámetro	Descripción
Microorganismos patógenos	E.coli, Salmonella, virus (poliovirus, hepatitis), huevos de helmintos (cisticercos, nematodos)

Nota.Fuente: [44] ,[46],[47].

TABLA IV
PROPIEDADES DEL MOVIMIENTO DEL LODO

Características fluidodinámicas	
Parámetro	Descripción
Viscosidad aparente	Resistencia al flujo del lodo
Penetrabilidad	Facilidad con la que se puede penetrar el lodo
Consistencia	Firmeza o rigidez del lodo
Capacidad de deshidratación	Habilidad para perder humedad bajo ciertas condiciones
Granulometría	Tamaño y distribución de las partículas sólidas

Nota.Fuente: [26]

TABLA V
PROPIEDADES CRÍTICAS EN UN LODO

Características críticas	
Parámetro	Descripción
Contaminantes persistentes	PCBs (bifenilos policlorados), PAHs(hidrocarburos aromáticos policíclicos).
Compuestos orgánicos emergentes EOCs y EDS	Fármacos, hormonas, plastificantes, productos de cuidado personal, edulcorantes, drogas y pesticidas.
Evaluación ecotoxicológica	Bioensayos con <i>Vibrio Fischeri</i> , <i>Salmonella Typhimurium</i> y <i>Allium Cepa</i>
Análisis de peligrosidad	Para determinar si el residuo es o no como CRETIB, según la normativa peligroso vigente

Nota.Fuente:[26],[27],[32],[48],[49],[50]

b) Composición estándar de lodos Industriales y otros

La tabla VI, evidencia como el origen del lodo influye en sus características físico-químicas, particularmente su afinidad con el agua[26].

Dependiendo de su composición (orgánica, mineral, aceitosa o fibrosa), el lodo puede presentar un comportamiento hidrofílico, es decir, mezclarse o absorber fácilmente el agua, o hidrofóbico, resistiendo a la mezcla o disolución en medios acuosos [26].

TABLA VI
RESULTADOS ESTANDAR EN ALGUNAS CARACTERIZACIONES DE LODOS

Compuestos generales de algunos lodos		
Categoría	Origen	Composición
Orgánico hidrofílico	PTAR doméstica, PTARI agro-alimentaria PTARI textil PTARI petroquímica	MO/MS 40-90% Pueden contener Fe, Al
Mineral hidrofóbico	PTARI acería	Óxidos, cenizas, partículas densas
Mineral hidrofílico	PTAP (planta de tratamiento de agua potable)	Hidróxidos de Fe, Al, arcilla, arena
Aceitoso hidrofóbico	Agua de acerías	Aceites minerales, partículas densas+aceite
Aceitoso hidrofílico	Agua de refinerías y talleres mecánicos	Emulsiones(aceite-agua), hidróxidos floculados
Fibroso	PTARI papelera	Celulosa 20-90%, minerales (caolín, carbonatos) 10-80%, lodo biológico 10-20%

Nota.Fuente:[26]

c) *Análisis de regulaciones*

El título 40 del código de regulaciones federales (CFR) de la EPA, contiene la mayoría de información sobre regulaciones sobre el manejo de residuos en estados unidos. Particularmente se puede acceder a los CFR mediante su versión digital eCFR [51].

Lo primero que debe considerarse es que la mayoría de información disponible en los CFR sobre lodos se encuentra bajo la definición de *sewage sludge* o lodos residuales, los cuales los definen específicamente como aquellos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales de origen doméstico [51].

La parte 503 de biosólidos, excluye expresamente a los lodos industriales, incluso si provienen de mezcla de aguas domésticas e industriales (lodos municipales), esto significa que los lodos industriales no se les puede aplicar la gestión de biosólidos bajo la normativa de estados unidos [52].

La parte 257 de residuos no peligrosos, contempla solo para los lodos no peligrosos el almacenamiento en rellenos sanitarios MSWLF, y otros que no estén regulados bajo la 503 de biosólidos [53].

La parte 261 determina si un residuo es peligroso o no [38]. En el caso de los lodos industriales provenientes de tratamiento de aguas, clasifican algunos como peligrosos, pero otros no tienen una categorización clara o están por fuera [38]. Además, la normativa no distingue explícitamente entre lodos de proceso y lodos de tratamiento de agua, lo que genera incertidumbre en la gestión [38].

En Colombia, por el contrario, El decreto 1287 de 2014, de biosólidos, dice que es posible usar lodos no peligrosos [54].

Por otro lado, define los biosólidos como producto resultante de la estabilización de lodos de tratamiento de aguas municipales; a su vez, las aguas municipales, se definen como aguas transportadas en el sistema de alcantarillado público, compuestas por aguas domésticas y no domésticas [54].

Las aguas no domésticas (ARnD) se definen como las procedentes de actividades industriales, comerciales o de servicios [55]. Esto indica que, bajo ciertas normas, es

posible usar los modelos convencionales de biosólidos para gestionar los lodos residuales industriales no peligrosos. Por el contrario, la naturaleza de los lodos industriales, requiere un marco normativo más detallado que contemple diferentes aspectos.

En el plan nacional de residuos de España (ley 10/1998), se establecen aplicaciones para los lodos residuales como agricultura, enmienda de suelo, aprovechamiento energético y almacenamiento en vertedero [26].

Al revisar la directiva 86/278/EEC de biosólidos, esta acoge tanto las aguas residuales domesticas como otras aguas con composición similar [56].

Según el glosario de prevención y gestión de residuos del MITECO de España, una de las industrias cuyas aguas pueden considerarse similares a las domésticas es la industria alimentaria [12].

No obstante, los lodos procedentes de otros sectores industriales no están claramente contemplados, lo que evidencia una falta de cobertura normativa específica.

En norma oficial mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002, es la norma para lodos y biosólidos, donde dice que los lodos por sus características propias o las adquirida después de un proceso de estabilización, pueden ser susceptibles a aprovechamiento, siempre y cuando cumplan con los límites permisibles, y posean una certificación de no peligrosidad [31]. En esta normativa hay especificaciones más útiles para la gestión de los lodos pero no especifica si los lodos industriales concretamente podrían entrar bajo esta regulación [31].

La norma chilena NCh 2880:2005 establece criterios para el compost y define los lodos como sólidos, semisólidos y líquidos generados durante el tratamiento de aguas residuales domésticas y/o industriales [57]. Además, dice que tipo de materias primas son compostables, como el lodo secundario de las agroindustrias, y excluye del proceso de compostaje materia prima que tenga sustancias no biodegradables [57].

Adicionalmente, proporciona directrices específicas para el compost producido a partir de lodos estabilizados, aunque no especifica el origen de ellos[57]. Esta normativa, ofrece una base inclusiva para el sector agroindustrial lo que facilita su aprovechamiento. La gestión de los lodos industriales presenta importantes desafíos normativos, aunque las regulaciones ambientales son esenciales para reducir el impacto de los residuos [26], en este caso algunas normas son demasiado restrictivas , dificultando su aprovechamiento , mientras que otras son muy generales o solo aplican a casos específicos.

Para lograr un manejo realmente eficiente y seguro, es indispensable establecer una regulación específica que contemple el ciclo completo de los lodos industriales, desde su origen, con criterios claros y trazabilidad, hasta el aprovechamiento dentro de las estrategias de la economía circular.

d) *Estimación de costos y cadena logística: Handbook estimating sludge management*

Este manual de la EPA de Estados Unidos, proporciona una guía para estimar los costos asociados a la gestión de los lodos en plantas de tratamiento de aguas residuales municipales [58].

Esta estimación es fundamental, ya que los costos de la gestión de lodos pueden representar hasta la mitad del costo total del tratamiento de aguas residuales [58].

El manual ofrece curvas de estimación que abarcan costos de capital, costos anuales y de operación y mantenimiento para 34 procesos comunes como tratamiento, almacenamiento, transporte, uso o eliminación de lodos [58]. Además, permite construir y comparar distintas cadenas de gestión de lodos y calcular los costos de cada una [58]. Las curvas cubren volúmenes de producción de hasta 100 millones de galones por año de lodo, equivalente a una planta con capacidad de 50 MGD(millones de galones de agua por día) [58].

Para estimar los costos del tratamiento de lodos, primero se debe diseñar la cadena de procesos a utilizar como (espesamiento, digestión, deshidratación, incineración, compostaje transporte, disposición) [58]. Según las necesidades específicas, luego, se realiza un balance de masa para calcular la cantidad de lodo (volumen y porcentaje de sólidos) que entra y sale en cada etapa, lo cual permite estimar los requerimientos de energía, insumos y transporte [58].

A partir de ahí, se utilizan las curvas o fórmulas del manual para calcular los costos de inversión, como (construcción y equipos), y los costos anuales de operación y mantenimiento (como energía, mano de obra, químicos) [58], usando datos básicos como el volumen anual de lodos, porcentaje de sólidos, distancia de transporte y tipo de equipo [58].

Finalmente, se suman los costos de todos los procesos para obtener el costo total del tratamiento, tanto inicial como anual [58].

e) Estabilización de materia orgánica

La MO puede presentar inconvenientes en el almacenamiento debido a la generación de gases, malos olores y descomposición [26]. En especial, la descomposición juega un papel clave porque puede generar cambios importantes en la composición del lodo, como el aumento de patógenos [26]. Dichos procesos atraen especies de animales e insectos que les atrae la MO, y esto los convierte en vehículos de patógenos o vectores [26].

Un lodo crudo o fresco es aquel que no ha pasado por procesos de estabilización, en cambio un lodo estabilizado o digerido, es aquel ya sufrió este proceso, que podría verse como un proceso de desactivación de riesgos [26].

Finalmente, el término biosólido se implementa cuando el lodo estabilizado cumple con los estándares para ser aplicado a terreno [59]. La estabilización es requerida cuando el lodo tiene más del 50% de MO.

Este proceso en general se divide en 2: la digestión (anaeróbica, aeróbica y el compostaje) y otros (estabilización química con adición de CaO, térmica o pasteurización y procesos de oxidación avanzada) [26].

Digestión

Consiste en realizar procesos anaerobios (sin oxígeno) o aerobios (con oxígeno) con el fin de estabilizar lodos con contenidos de agua del 85% o más [26].

Anaerobia: Descompone completamente la MO y elimina la mayoría de bacterias como salmonella, aunque no es eficaz contra virus y huevos de helmintos[26]. Se puede realizar a temperaturas mesófilas(35-40°C) durante 16-45 días, o termófilas (50-60°C), durante 8-12 días [26].Este proceso se realiza en grandes tanques cerrados y genera biogás , que puede aprovecharse para el funcionamiento de la planta [26] .No obstante, también produce aguas residuales que deben tratarse de nuevo [26].

Aerobia: Elimina menos MO que la anaerobia y depende de que el oxígeno se transfiera adecuadamente en el medio [26]. También puede realizarse en condiciones mesófilas o termófilas, siendo las últimas parecidas al compostaje [26].

Compostaje: Es un proceso aeróbico que se hace con lodos secos o deshidratados con ayuda de materiales que mejoran su porosidad[26]. Genera calor y puede alcanzar temperaturas mayores a 70°C, lo que ayuda a eliminar patógenos [26]. Este proceso se puede realizar mediante estructuras de pilas, túneles, canales etc. Los principales problemas son malos olores y gases tóxicos al recibir los lodos , y la baja proporción carbono/nitrógeno (C/N) , que provoca emisiones de amoníaco NH₃ [26]. Sin embargo este producto es objeto de muchos estudios porque es comercializable[26].

Otros procesos de estabilización de lodos

Estabilización química con cal viva (CaO): En plantas de tratamiento de agua residual pequeñas o medianas, no suele ser viable construir grandes digestores para estabilizar lodos ; en estos casos, se aplica esta alternativa tanto a los lodos secos como húmedos [26]. La cal ayuda a esterilizar temporalmente el lodo al eliminar bacterias, gracias al aumento de pH, aunque no reduce la MO biodegradable [26]. Es una opción económica, pero presenta problemas de almacenamiento, ya que la cal puede degradarse si se hidrata o se carbonata [26].

Tratamientos térmicos: La pasteurización elimina patógenos, mientras que la incineración a altas temperaturas elimina completamente de la materia orgánica , aunque esta última técnica solo es rentable en plantas grandes [26]

f) Tratamientos de reducción de agua

El principal problema de los lodos es su transporte, debido a su elevado contenido en agua; esto provoca que ocupen grandes volúmenes de almacenamiento [22]. Por esta razón, los procesos de reducción de agua son fundamentales para facilitar su manejo [22].

Para comprender el comportamiento del agua en los lodos, es importante reconocer que estos están formados por partículas suspendidas en fase acuosa, que generalmente se agrupan en forma de flóculos [22].

La estructura de estos flóculos influye directamente en la forma en que el agua se desplaza entre sus intersticios, lo que determina la facilidad con la que puede ser eliminada durante los diferentes procesos de reducción de agua [22].

Se distinguen cuatro tipos de agua en los lodos, cada una con diferente grado de retención y dificultad para ser eliminada [22].

Además, se puede asociar la intensidad del color del lodo, con la porción de agua que contiene, es decir, los lodos más claros tienden a tener mayor proporción de agua libre, mientras que los más oscuros presentan más agua ligada, lo que los hace más difíciles de deshidratar [22].

Agua libre: Es el agua que no está unida a los flóculos y que puede eliminarse fácilmente por gravedad o centrifugación [22]. Se asocia comúnmente con lodos más claros [22].

Agua intersticial: es el agua atrapada en los espacios entre los flóculos [22]. Aunque no fluye con tanta facilidad como la libre, aún puede ser removida mediante centrifugado o filtración [22].

Agua superficial o capilar: es el agua unida por fuerzas físicas (adsorción y adhesión) a la superficie de los flóculos [22]. Requiere acondicionamiento químico, como el uso de polímeros para facilitar su eliminación [22].

Agua intracelular: es el agua contenida dentro de las células microbianas, vivas o muertas [22]. Solo puede eliminarse mediante procesos como digestión aerobia/anaerobia o tratamientos térmicos. Esta se asocia a los lodos de tonalidades más oscuras y mayor dificultad de deshidratación [22].

Adicionalmente, estas tonalidades en la estructura del flóculo pueden apreciarse mejor mediante la técnica de microscopía, donde también se pueden observar factores microbiológicos claves en el lodo, mediante la presencia de ciertas especies [60],[61]

A continuación, se muestran algunas fotos en microscopio de lodo residual fresco, de una planta de tratamiento en Colombia, con el fin de esquematizar los aspectos visuales del agua en los lodos mencionados anteriormente.

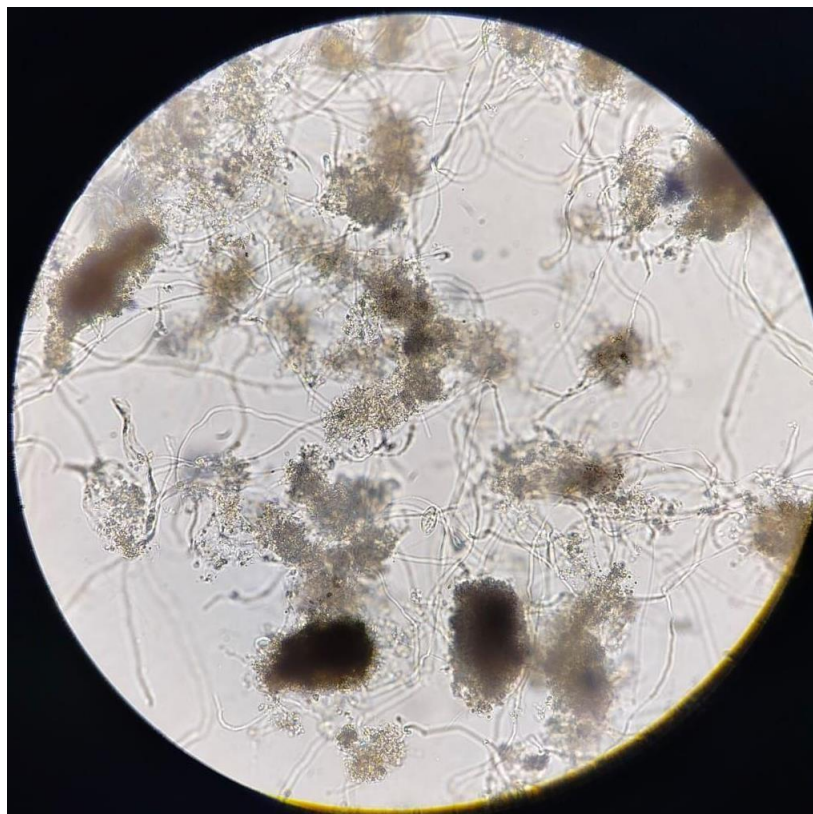


Fig III.Foto de lodo fresco en el laboratorio de procesos biológicos de la Universidad de Antioquia

Nota.Fuente: [62]

En esta imagen se puede evidenciar como algunos flóculos tienen unas tonalidades más claras, medias y otras más oscuras. Como se indicó anteriormente, en los flóculos con tonalidades más oscuras, predomina el agua intracelular, lo que indica que el agua está muy arraigada al flóculo y es muy difícil de extraer [22].

Las tonalidades medias están asociadas a agua superficial o capilar, la cual requiere pasos extra para remover el agua [22].

Otros flóculos más claros, indican la presencia de agua intersticial, la cual tiene más facilidad de remoción [22]. Además, el agua que contiene estos flóculos, es decir donde se encuentran suspendidos, es el agua libre, la cual no está unida a los flóculos y puede eliminarse por gravedad [22].



Fig IV.Foto de lodo fresco en el laboratorio de procesos biológicos de la Universidad de Antioquia

Nota.Fuente: [62]

En esta imagen se puede apreciar mejor, como un solo flóculo, puede tener tonalidades claras, medias y oscuras en diferentes partes de su estructura, lo que indica que un mismo flóculo, en si podría tener los 3 tipos de agua intersticial, superficial e intracelular.



Fig V. Esquema de flóculo con los tres tipos de agua

Nota.Fuente: [26].

Este es un esquema del flóculo donde se trata de marcar con líneas más precisas las zonas claras, medias y oscuras en un flóculo.

Los principales procesos para eliminar el agua son: espesamiento, deshidratación o secado mecánico y secado térmico [26].

Para aplicar los diferentes procesos se debe tener en cuenta que generalmente el lodo puede contener entre el 95- 98% de agua [26],[63].

Espesamiento

Este método se hace en tanques grandes dimensiones y tiene tres métodos principales [26].

Espesadores estáticos : el lodo se decanta por gravedad y se recoge en el fondo [26].

Espesadores dinámicos: usa la floculación para concentrar el lodo en la parte superior y se retira con aspas [26].

Escurrecido mecánico: hace pasar el lodo por un filtro poroso [26]. Este es útil en plantas pequeñas [26].

Deshidratación

Es un proceso destinado a separar el agua de la materia sólida contenida en los lodos. Durante este proceso, el agua resultante suele contener sólidos finos y nutrientes disueltos, mientras que la fracción sólida seca se conoce como "torta" [22]. Mientras que, el agua resultante podría requerir nuevamente tratamiento [22].

Previamente a la deshidratación, debe realizarse un acondicionamiento químico para mejorar el proceso [26]. Este consiste en aumentar el tamaño de las partículas (coloides) en suspensión [26]. Eso se logra neutralizando las cargas eléctricas que mantienen el agua unida a los sólidos [26]. Cuando más grandes son las partículas, más rápido se sedimentan, y más fácil es eliminar el agua durante la deshidratación [26].

Secado térmico

Este proceso elimina el agua por evaporación, no obstante, este método es una opción costosa. Existen varios métodos de secado térmico: según el tipo de transferencia de calor y según la temperatura [26].

-Transferencia de calor:

Directo (convección), el lodo se calienta por contacto con aire caliente [26].

Indirecto(conducción), el lodo se calienta por contacto con superficies calientes [26]. Mixto, combinado convección y conducción [26].

-Por rango de temperatura:

Alta temperatura (800°C), en hornos especiales; puede aprovechar la autocombustión del lodo [26]. Intermedia (120-150°C), usa gas o fuel (derivado del petróleo) para calentar [26].

Baja temperatura: (80°C), requiere más espacio, como en eras de secado al aire libre [26].

En la siguiente tabla se recopila los porcentajes de agua eliminados del lodo luego de cada proceso de reducción de agua.

TABLA VII
RESUMEN DE PORCENTAJES DE AGUA REDUCIDOS EN DIFERENTES PROCESOS

Proceso	% agua eliminada
Espesamiento	5-10
	15-35
Deshidratación	
Secado térmico	85-95

Nota.Fuente: [22],[26],[64].

Nota: para profundizar en los tratamientos de reducción de agua y estabilización de MO se recomienda revisar las fuentes adjuntas en el anexo.

4) Impactos ambientales de lodos industriales

Los lodos industriales, al igual que los generados en plantas de tratamiento de aguas residuales, tienen una composición variable que depende directamente de la carga contaminante del agua residual inicial [12].

Esto se debe a que el proceso de tratamiento del agua, concentra los contaminantes presentes en forma de materia suspendida o disuelta en los lodos [12]

Los lodos industriales podrían tener diversas sustancias peligrosas o compuestos emergentes que por su toxicidad, persistencia o capacidad de bioacumulación, representan riesgos para la salud humana y el ambiente [27],[66],[67],[68],[69],[70]

El manejo inadecuado de los lodos industriales aplicados en suelos, puede presentar riesgos de acumulación de elementos potencialmente tóxicos en el suelo, que luego pueden ingresar en los cultivos y luego a la cadena trófica [71].

Los lodos industriales incluso no industriales, podrían tener contaminantes críticos incluso después de pasar por tratamientos, como metales pesados (cadmio, cromo , cobre, mercurio, níquel, plomo, zinc), así como diversos compuestos orgánicos AOX, LAS , DEHP, NP/NPE, hidrocarburos poliaromáticos PAH, bifenilos policlorados PCB , dioxinas y furanos PCDD/F y las sustancias perfluoralquiladas PFAS [27],[67],[72],[73], .

Los PFAs, representan un caso particular por su alta toxicidad y persistencia [70],[74]. Si bien están regulados en el agua potable en algunos países , aún no hay normativas claras para su tratamiento en lodos residuales [70],[74].

La aplicación de los lodos residuales o de depuradora en suelos, constituye una forma de contaminación difusa que representa un riesgo significativo para la salud humana y el ambiente [75].

Esta forma de contaminación es difícil de cuantificar [75] . Su gravedad y alcance varían según el tipo de lodo, su tratamiento y las condiciones del suelo [75] .

Los lodos son una fuente importante de metales pesados como zinc, cobre , níquel, plomo y cromo, así como contaminantes orgánicos persistentes , nutrientes en exceso y agroquímicos [75]. Estos pueden ser transportados por el agua o el viento y alcanzar otras

matrices ambientales [75].

Cuando los lodos se aplican como fertilizantes en agricultura, suelen contener altas concentraciones de hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP), que son tóxicos y persistentes [75]. También se ha identificado presencia de contaminantes emergentes como los compuestos perfluorados PFCP, los cuales no se eliminan eficientemente en el tratamiento de aguas residuales, y terminan acumulándose en los lodos , transfiriendo así la contaminación a otra matriz [75]

Los compuestos mencionados, pueden dañar los microorganismos beneficiosos del suelo , alterando los ciclos biogeoquímicos y afectando la salud del ecosistema [75]. También se han identificado en los lodos pesticidas, microplásticos y huevos de helmintos.

Los métodos de secado térmico requieren mucha energía y aumentan emisiones de gases de efecto invernadero [76] , lo que indica que no solo hay impactos por el contacto directo, si no también en el proceso de transformación de los lodos.

Hoy por hoy, es limitada información acerca de la cuantificación de contaminantes en los suelos a los que se aplicó biosólidos , lo cual es preocupante dada su persistencia , su capacidad para actuar como agentes antimicrobianos, y su posible papel en la generación de resistencia bacteriana[75].

Los contaminantes pueden liberarse al ambiente tanto por accidentes como por aplicaciones de lodos[75]. Aunque los lodos aportan materia orgánica y nutrientes , su aplicación sin tratamiento adecuado puede introducir contaminantes al suelo y eventualmente a la cadena alimentaria[75].

Algunas sustancias como antibióticos presentes en aguas residuales y en lodos, como la tetraciclina, amoxicilina y fluoroquinolonas, pueden ser absorbidas por los cultivos, mientras que otras como la fluoxetina y miconazol, no son absorbidas por las plantas [75].

Otro caso son los plastificantes como el bisfenol y los ftalatos , que se encuentran en productos como aceites , pinturas, pegamentos y envases [75]. Estos se han detectado en suelos agrícolas y urbanos donde se aplicaron lodos , y están asociados a efectos negativos en la salud, por su acción como disruptores endocrinos[75].

La falta de normativas claras sobre calidad de los lodos destinados a usos agrícolas implica un riesgo considerable [75].

Aunque la economía circular promueve su uso como fertilizantes , se requiere una regulación específica para evitar su uso sin control[75]. El desconocimiento sobre la composición exacta del lodo , y el comportamiento ambiental de sus componentes , incluso aquellos nuevos o transformados , impide una gestión segura[75] .Es fundamental analizar los componentes del

lodo antes de su aplicación [75].

No se deben aplicar los lodos sin tratamiento previo ya que representan un riesgo considerable a la salud pública y el ambiente [75].

Desde el punto de vista microbiológico, existe el riesgo de que las bacterias autóctonas del suelo no estén adaptadas a coexistir con bacterias alóctonas o foráneas, presentes en los lodos, lo que puede generar desequilibrios en la microbiota del suelo [75]. Por ello se requieren estudios en laboratorio, para entender estas interacciones, así como la incorporación de una nueva especie a un ecosistema [75].

Finalmente, se hace necesario investigar más sobre la propagación de bacterias resistentes y genes de resistencia antimicrobiana RAM, a través del uso de lodos y enmiendas [75].

Se presenta en la tabla 8, los impactos ambientales a las diferentes matrices que causan los lodos industriales, teniendo en cuenta el inadecuado manejo o la presencia de contaminantes críticos como los mencionados anteriormente.

TABLA VIII
IMPACTOS AMBIENTALES EN LAS DIFERENTES MATRICES

Litosfera (suelo)	Cambios en el uso del suelo, reducción de la productividad agrícola ocasionado por contenidos de sulfuros, cromo, cal, grasa y materia orgánica de los lodos. Fijación de metales pesados al suelo. Daños en la textura y estructura del suelo. Cambios bruscos en el pH del suelo. Cambios en el drenaje natural del suelo. Cambios en la porosidad del suelo por la relación de volumen entre gases, líquidos y suelo; afectando la aireación y el movimiento del agua subterránea. Afectación de microorganismos y estructura del suelo por la presencia de contaminantes. Pérdida de la fertilidad del suelo.
Atmosfera (aire)	Producción de olores ofensivos debido a la descomposición de la materia orgánica y la presencia de sulfuro en los lodos. Transporte de partículas del lodo con contaminantes adheridos que pueden terminar en otras matrices. Emisiones de gases de efecto invernadero en tratamientos térmicos.

Hidrosfera(hídrico)	Cambios en la turbidez y el color del cuerpo receptor, disminuyendo el paso de la luz solar y afectando procesos fotosintéticos en el agua. Cambios bruscos en el pH del agua, afectando la biota acuática. Disminución de la calidad del agua para consumo humano y otros usos. Contaminación en aguas superficiales y subterráneas. Eutrofización de cuerpos de agua por lixiviación de fósforo y nitrógeno.
Biosfera (fauna y flora)	Acumulación de metales pesados en los animales. Absorción de contaminantes por plantas degradando la vegetación. Disminución de animales acuáticos, por la presencia de contaminantes y reducción de oxígeno. Fitotoxicidad, zootoxicidad
Noosfera (salud pública)	Alteraciones en la salud de los trabajadores por contacto directo o inhalación durante el manejo de los lodos, o a comunidades aledañas por lixiviaciones u olores. Disminución de ingresos económicos del sector por el manejo inadecuado de lodos y falta de aprovechamiento de los mismos. Eventual retorno de contaminantes al cuerpo humano.

5) *Aplicaciones para lodos industriales*

Según el plan nacional de residuos de España (ley 10/98). Se establecen tres posibles destinos finales para los lodos municipales o depuradora (utilización en agricultura y enmienda de suelos , aprovechamiento energético , incluyendo la incineración , vertedero o relleno sanitario) [26].

Desde el siglo XIX, se ha transformado el lodo residual en fertilizantes [80].

En EEUU desde 1920 se comercializan productos como “Milorganite” y “compro”, usados incluso en jardines de la Casa Blanca. Marcas como “GroCo” y “Dillo Dirt” también tienen una alta demanda [80].

En 2005 , la EPA reportó que EE.UU generó unos 7 millones de toneladas de biosólidos : 60% se usó en agricultura , 17% se envió a rellenos sanitarios, 20% fue incinerado , y el resto se usó en recuperación de tierras[80] .

Sin embargo, los biosólidos tienen mayores restricciones ambientales por los riesgos sanitarios y ecológicos. A pesar de ello, la producción de estos sigue aumentando debido a nuevas plantas de tratamiento [80].

a) Específicas

La revisión bibliográfica muestra aplicaciones exitosas de lodos industriales, y tecnologías implementadas para mejorar la calidad del lodo dependiendo el sector. Por otra parte, en muchos casos no se detallan los tratamientos previos ni las tecnologías utilizadas para la transformación inicial del lodo industrial, lo que dificulta replicar los resultados, ya que la calidad del lodo varía significativamente en cada caso. Además, cada estudio aplica normas y criterios distintos.

Sector textil

Aplicaciones como enmienda de suelo

- En cultivos de pimiento verde (*Capsicum Annuum*), el uso de 45kg de lodos residual textil que previamente fue compostado y cumplió la norma mexicana NOM-004-SEMARNAT- 2002, mejoró variables del crecimiento como altura, número de hojas y frutos [81]. Los niveles de metales pesados en los frutos se mantuvieron dentro de los límites permitidos por Codex Alimentarius de la FAO , validando su uso agronómico y sanitario [81].
- En cultivos de tomate , usando 10% de lodo textil crudo mezclado con “peat

Moss” y perlita (70:30 en volumen) , aumentó la vitamina C sin alterar el pH, ni generar transferencia de metales pesados, aunque se detectaron huevos de helmintos a altas concentraciones (20%) [82] .

- En hortensias, el uso de lodo con certificado CRETIB de no peligrosidad y bajo la norma SEMARNAT al 10%, mejoró el desarrollo vegetal y aumentó el potasio, sin afectar negativamente el contenido de clorofila [83]. Concentraciones superiores de lodo, alteran el pH y la conductividad eléctrica del sustrato [83].
- El lodo textil compostado con aserrín, estiércol vacuno y pasto es buen candidato porque contiene 18.4% de MO y potasio, además cumple con la norma chilena NCh 2880 para compost clase B, sin exceder límites de metales, coliformes, ni grasas [84]. Sin embargo, no se logró eliminar completamente los huevos de helmintos provenientes del estiércol vacuno, incumpliendo con la NTP 3111.557 de Perú [84].
- Un lodo textil certificado como no peligroso, bajo los criterios CRETIB y regulado bajo la LGEEPA y SEMARNAT de México, mezclado con sustrato de turba de musgo y perlita (70:30 v/v), fue aplicado en cultivos ornamentales y forestales, demostró beneficios productivos sin riesgos significativos por metales pesados, aunque, se encontraron niveles bajos de huevos de helmintos y coliformes fecales [85]. Aunque se registró un aumento de pH y la conductividad eléctrica de los lixiviados, no se alteró la porosidad del sustrato., y se aportó nutrientes minerales como nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, sodio, cobre, magnesio, hierro zinc, pero el magnesio disminuyó [85]. Además incrementó la concentración de vitamina C en las plantas [85].
- Un tratamiento eficaz para remover la contaminación orgánica en los lodos textiles crudos, es la adsorción iónica de metales pesados, mediante pellets elaborados con carbón activado, zeolita activada, cal viva, EDTA y CMC [86]. Este proceso permitió reducir significativamente las concentraciones de metales pesados, haciendo que el lodo dejará de ser peligroso, según los límites establecidos en la normativa de residuos peligrosos de Ecuador [86]. Posteriormente, el lodo tratado fue incorporado a un proceso de compostaje junto con gallinaza, poda y cachaza, generando un abono orgánico de valor y alcanzando una rentabilidad de 4.02 \$ dólares por cada kilogramo tratado [86].

Aplicaciones en fabricación de ladrillos

- Un lodo textil, con certificación de no peligrosidad CRETIB y bajo la norma NOM-SEMARNAT-2005 de México, implementado como sustituto parcial de suelo para la fabricación de ladrillos al 5 %, mostro una reducción del 19% en la resistencia, pero manteniéndose dentro de los parámetros establecidos para ladrillos de mampostería de ecuador NTE INEN 3049 [87]. En contraste, si se aumenta el reemplazo 20-30%, la resistencia disminuye drásticamente, causando fracturas e incumpliendo con la norma vigente [87]

Sector curtiembre

Aplicaciones como Enmienda de suelo

- Es una alternativa viable para estabilizar y disponer los lodos generados durante el proceso de pelambre, ya que presentan una relación carbono/nitrógeno (C/N) de 14,67 cercana al rango óptimo (15-20), lo cual permite una descomposición aceptable, aunque ligeramente más lenta [77]. Una vez deshidratados y transformados en compost, estos lodos pueden aplicarse en zonas de recuperación paisajística o reforestación, ya que aportan nutrientes y reducen la contaminación por disposición inadecuada [77].
- Los lodos no peligrosos mediante procesos como biolixiviación, compostaje y vermicompostaje, ayudan también a la degradación de contaminantes [88].
- El lodo de curtiembre compostado con paja de azúcar y estiércol de ganado en proporciones 1:1:3, aplicando una dosis de 7.5 toneladas de compost por hectárea, aumentó la biomasa microbiana del suelo y la producción de CO₂ [89]. No se evidencio afectaciones a los microorganismos, aunque se requieren estudios adicionales para evaluar a largo plazo y con aplicación constante si este tipo de compost afecta el suelo [89].
- Se implementaron diferentes compost con lodos de curtiembres, uno con caña de azúcar y estiércol de vaca 1:3:1 (v:v:v) , otro con paja de carnauba y estiércol de vaca, con la misma proporción [90]. Se aplicaron en suelo y aumentaron las concentraciones de Cu,Cd,Cr,Zn,Pb,Ni,MoyMn [90]. Además, la disponibilidad de nutrientes esenciales favoreció el crecimiento de las plantas, lo que llevó a incrementos significativos de la biomasa, contenido de clorofila y el rendimiento del Capiicum cultivado con el compost [90]. Se resalta que es una buena opción el uso

de plantas ornamentales que tengan tolerancias a concentraciones elevadas de metales pesados [90].

Sector alimentario

Aplicaciones como enmienda de suelos

- Los lodos de matadero también se utilizan en compostaje y vermicompostaje (lombricultivo). Según la NOM-004-SEMARNAT-2002 de México, pueden clasificarse como biosólidos tipo A, es decir, de alta calidad sin patógenos y ricos en nitrógeno [91]. La metodología de pilas aireadas por volteo es económica y rentable, especialmente si se combina con la producción y venta de lombrices [91].
- En industrias cárnicas, florícolas, madereras y residuos vegetales, el compost semimaduro, puede emplearse para recuperar suelos agrícolas a mediano o largo plazo, mejorando sus propiedades físico-químicas [92]. Se recomienda una dosis del 20%, o del 50% en suelos más degradados [92]. Por otro lado, el compost maduro es ideal para suelos erosionados, en los que se planea iniciar agricultura a corto plazo, también en una dosis del 50% [92].
- En la industria vinícola, se demostró que una mezcla del 10% de lodos con orujos y escobajos, mejora el compostaje, estabiliza el pH y no presenta toxicidad vegetal [93]. El compost obtenido es apto para su uso agrícola y cumple con la normativa Chilena (compost clase B) [93].
- Los lodos tratados de la industria de aceite de palma, pueden emplearse como abono orgánico en cultivos de palma africana [94]. Estos mejoran las condiciones del suelos , promueven el crecimiento vegetal , reducen el uso de fertilizantes químicos hasta en un 50% , y eliminan los costos de disposición final [94].

Aplicaciones en fabricación de ladrillos

- Los lodos de la industria Láctea no son peligrosos y pueden ser usados como materia prima en la fabricación de ladrillos [95]. Una mezcla del 5% de lodo con suelo, cumple con las normas técnicas NTE-INEN 297 cerámicos y ladrillos de ecuador [95]. A mayor proporción (30%), los ladrillos son aptos solo para estructuras sin carga o mampostería.

Además, el uso de cal para la estabilización del lodo, disminuyó la resistencia del material por la presencia de dolomita [95]. Una proporción óptima para la fabricación de ladrillos es de 90% de arcilla y 10% lodo [95]. Mayores porcentajes de lodo, afectan propiedades como la porosidad y resistencia, generando defectos estructurales [95].

Sector papelerero

Aplicaciones en Enmienda de suelos

- Los lodos papeleros tienen altos niveles de celulosa, lignina, hemicelulosa, nitrógeno (3-4%), y una variedad de nutrientes como potasio, fósforo, magnesio, calcio, hierro, cobre, manganeso y zinc; lo que les da un valor significativo como material aprovechable, debido a su alto contenido de materia orgánica [96].

Los lodos papeleros en técnicas de compostaje y lombricultivo, permiten obtener mezclas con propiedades de carbono y nitrógeno cercanas a las óptimas para aplicaciones agrícolas [96]. Esto facilita su incorporación como fertilizante orgánico en cultivos [96].

- Los lodos papeleros en combinación con el estiércol de vaca, han mostrado mejoras significativas en el peso de las mazorcas, el rendimiento del forraje verde y la calidad del suelo [97]. Entre los beneficios observados, se incluyen incrementos en el contenido de fósforo y potasio, mejor conductividad eléctrica, pH y la capacidad de intercambio catiónico del suelo [97].

Aplicaciones en fabricación de Zeolitas sintéticas

- Las zeolitas son minerales que se pueden formar artificialmente a través de tratamientos térmicos e hidrotérmicos (calor y ácido) [98]. En el caso de los lodos papeleros, es posible implementarlos como materia prima en el proceso de síntesis de zeolitas, transformando sus componentes en estructuras cristalinas como zeolitas A, P y NaP-CaP [98]. Estas zeolitas tienen aplicaciones ambientales importantes [98]. La zeolita A permite captura de gases de efecto invernadero, y la remoción de iones como Ca^{2+} y Mg^{2+} [98]. La zeolita P, eliminar metales pesados y amonio en aguas residuales. la zeolita NaP-CaP remueve simultáneamente amonio y fosfatos [98].

En síntesis, las aplicaciones que más destacaron para los lodos industriales fueron la enmienda de suelos, la construcción de ladrillos de mampostería y otros usos que implementaron los lodos como materia prima para la elaboración de productos.

Según la composición y el tipo de industria, las aplicaciones tienen especificidades y/o podrían requerir tratamientos adicionales para ajustarse a la norma. Asimismo, algunas opciones pueden ser más viables, eficientes o económicas que otras, por lo tanto, cada aplicación debe evaluarse rigurosamente considerando riesgos, limitaciones y condiciones específicas.

La clasificación de enmienda, se hizo teniendo en cuenta que esta tiene el propósito de mejorar las propiedades químicas, físicas y biológicas del suelo, y aportan macro y micronutrientes [79].

Cabe resaltar que se diferencia de fertilizante, porque el fin de este es solo proveer nutrientes para el crecimiento de plantas, no para el bienestar del suelo [79]. Dentro de las diferentes enmiendas de suelo que existen están el compost, que fue la más se implementada, estiércol animal, residuos vegetales, lodos de depuradora y abono verde [79].

Estrategias de estabilización o descontaminación de lodos industriales.

- La biorremediación es una estrategia biotecnológica económica sustentable, que utiliza microorganismos, enzimas o plantas para remover o transformar contaminantes en compuestos menos tóxicos [80],[99],[100]. Entre sus técnicas más destacadas está la fitorremediación, que emplea plantas que pueden ser genéticamente modificadas, con el fin de absorber metales pesados y otras sustancias peligrosas [80],[99],[100]. Es una alternativa de bajo costo que representa una solución eficaz para el tratamiento de lodos y biosólidos [80],[99],[100].

- Estabilización/ solidificación se recomiendan para los lodos con propiedades tóxicas o inflamables (como los del pelambre y curtido), para reducir su toxicidad [88].
- *Co-procesamiento* es un proceso térmico eficaz para todos los tipos de lodos, eliminando patógenos y minimizando contaminantes [88].
- *La Reducción de cromo en la etapa de curtición*, puede lograrse mediante un sistema de curtido de alto agotamiento, que mejora la fijación del cromo en las pieles usando curtientes más reactivos y condiciones óptimas (temperaturas, pH, y tiempo) [77]. El uso de sulfato de cromo enmascarado orgánicamente permite reducir hasta un 60 % del cromo en el efluente y en los lodos [77]. Además , la recirculación del efluente , previamente tratado, permite reutilizarlo en el piquelado, reduciendo aún más la carga de cromo, optimizando agua y productos químicos , y manteniendo la calidad del cuero [77] .
- *La Biolixiviación* se emplea microorganismos como *Acidithiobacillus ferrooxidans*, para solubilizar Cr(III) y reutilizarlo en el proceso de curtido [88]. Este método puede eliminar hasta el 95,6% del cromo y permite que el lodo residual se utilice como fertilizante [88]. No obstante, es necesario un tratamiento previo con aireación para eliminar sulfuros y materia orgánica antes de su reutilización [88].
- Los lodos de la industria Láctea mediante compostaje aeróbico en pilas, logran estabilizar sus grasas y aceites. Para este proceso, se usan materiales estructurantes como tamo de cebada, viruta o aserrín para mejorar el proceso, aunque las partículas finas pueden limitar el intercambio gaseoso esencial para la degradación orgánica [101].

b) Biosólidos

Tal como se mencionó en las consideraciones sobre la gestión de los lodos industriales, este apartado puede aplicarse a los lodos generados por la industria alimentaria y aquellos similares a los lodos domésticos, no peligrosos, y siempre que todos sus compuestos estén debidamente regulados. Esto será posible siempre y cuando la normativa vigente relacionada (biosólidos,

residuos no peligrosos y residuos peligrosos) lo permita, y se cuente con respaldo técnico – científico, y un monitoreo constante.

Cuando los lodos han pasado por procesos de estabilización o tratamientos, y cumplen con los requisitos normativos para ser aplicados en suelo, se consideran aptos para su aprovechamiento y pasan a denominarse biosólidos [31],[59].

Clases de biosólidos

- **A:** biosólidos sin patógenos detectables, aptos para uso sin restricciones [102]. Se logran mediante tratamientos térmicos, químicos, procesos avanzados o aprobados por la autoridad competente [102].
- **B:** permiten presencia limitada de patógenos, pero deben cumplir controles como monitoreo de organismos indicadores, o tratamientos específicos [102].

Tipos de biosólidos

Estos dependen de la calidad del lodo, tratamiento y contenido de patógenos [102]. Además, dependiendo el tipo de clase, se permiten en diferentes terrenos con ciertas restricciones [102].

- EQ (calidad excepcional) [102].
- PC (concentración de contaminantes) [102].
- CPLR (tasa de carga acumulada de contaminantes) [102].
- APLR (tasa de carga anual de contaminantes) [102].

En la tabla 9, se muestra según la clase y tipos de biosólidos, las diferentes aplicaciones en suelo o restricciones que deben cumplir los biosólidos. Esto teniendo en cuenta también, que pasos deben seguir para disminuir la atracción de animales e insectos, que se vean atraídos por la materia orgánica.

TABLA IX
APLICACIONES EN SUELO Y CLASE DE BIOSÓLIDOS

Tipo de biosólidos	Clase de biosólidos	VAR(10 opciones disponibles para reducción de atracción de vectores)	Tipo de terreno	Restricciones
EQ	A	1-8	Todos	Ninguna
PC	A	9 ó 10	Todos excepto césped y jardines domésticos	Prácticas de manejo
	B	1-10	Todos excepto césped y jardines domésticos	Prácticas de manejo y restricciones del sitio
CPLR	A	1-10	Todos excepto césped y jardines domésticos	Prácticas de manejo
	B	1-10	Todos excepto césped y	Prácticas de manejo y

			jardines domésticos	restricciones del sitio
APLR	A	1-8	Todos, pero lo más probable es que se apliquen en césped y jardines domésticos	Etiquetado y prácticas de manejo

Nota.Fuente: [102].

c) *Otras alternativas*

Recuperación de materiales

- Mediante el uso de un líquido iónico prótico PIL, es posible la descontaminación de lodos industriales contaminados con metales pesados, y la extracción de sus lípidos selectivamente [103]. Este proceso permite obtener un producto rico en lípidos, y otro rico en proteínas y carbohidratos, que puede aprovecharse como bioproductos, fertilizantes o alimento para animales [103]. Esta técnica es más amigable, ya que evita el uso de disolventes orgánicos o ácidos agresivos [103]. La recuperación de metales en los lodos es otra opción que está en estudio [104],[105]. Hay procesos que se centran en la recuperación de cromo, zinc, y hierro, incluso metales preciosos como el oro, platino, paladio, rodio, iridio, rutenio y osmio [104],[105].

Insumos

- Un estudio elaboró biofloculante a partir de lodo deshidratado mediante hidrólisis química, para aplicarlo en aguas residuales domésticas, la eficiencia del floculante, alcanzó eficiencia del 97.31% con desviación estándar ± 0.26 en condiciones óptimas [106]. La eficiencia es debido a la neutralización de la carga que

favorece la adsorción superficial, la captación de hidróxidos de hierro, aluminio y otros grupos funcionales. Además, es un componente estable y útil para la eliminación de fósforo en aguas residuales urbanas [106].

- Cuando los lodos pasan por un proceso de deshidratación, lo que se obtiene es una torta; con esta, un estudio realizó un inóculo eficaz para tratar los residuos de cocina, debido a que reduce las emisiones de dióxido de carbono en comparación con los métodos convencionales [107]. Incluso, los productos resultantes como gas metano, lixiviado y digestato, con una adecuada planeación, se pueden usar como fuente de energía, fertilizante y acondicionadores de suelo [107].
- La sintetización de lodo con vidrio reciclado, da lugar a materiales duraderos y resistentes, incluso a una temperatura de cocción relativamente baja [108]. La variabilidad de las propiedades del lodo, implica que no existe un método único ideal [108]. Sin embargo, la sintetización para producir agregados livianos, destaca como una de las mejores opciones por su inercia, durabilidad y bajo riesgo de lixiviación, aunque los factores de uso energético pueden ser altos [108].
- La incineración es otra opción para el manejo de biosólidos, ya que reduce significativamente su volumen y permite recuperar energía a través de la quema de materia orgánica [109]. Es especialmente útil en zonas urbanas con restricciones de espacio y regulaciones ambientales estrictas [109]. Los ensayos piloto han demorado que la co- incineración con un 10% de biosólidos y 90% de pellets de madera de calidad premium, logra una combustión eficiente sin exceder los límites de emisiones [109]. Frente a otras estrategias como el vertido o la aplicación en suelos, la incineración es una manera económica [109].

Cobertura protectora

- Hay estudios donde se propone usar biosólidos como cobertura subacuática para relaves mineros, es decir, los biosólidos pueden usarse como una cobertura subacuática en zonas con residuos mineros porque actúan como una barrera física que evita que los metales pesados se filtren al suelo o al agua [110]. Aunque liberan cantidades pequeñas de níquel, en general retienen la mayoría de metales [110]. Cabe resaltar que son estables en condiciones sin oxígeno, lo que los hace efectivos a largo plazo , aunque se recomienda monitorear su comportamiento con el tiempo [110].
- El uso de biosólidos + Biochar es una alternativa prometedora para fitoestabilizar los relaves mineros, mejorando la calidad del suelo e inmovilizando

los metales pesados , especialmente Zn, Cuy Cd [111] .

B. Biofactoría o biofábrica

Es un nuevo modelo de planta de tratamiento, que aplica los principios de la economía circular, para transformar los residuos en un material nuevamente aprovechable [112].

En el caso de los lodos, se plantea para la obtención de energía en forma de calor, biogás, recuperación de nutrientes, entre otros [112]. Incluso bioinsumos cuyo origen son los microorganismo o macroorganismo, destinados a utilizarse como insumos en actividades relacionadas a las agroindustrias [113].

Este concepto de biofactoría es importante para el manejo de los lodos , porque su gestión representa los mayores desafíos técnicos y económicos del tratamiento de las aguas residuales , llegando a representar hasta el 50% de los costos totales [58]. Cabe resaltar, que muchas tecnologías para la transformación de los lodos requieren grandes espacios, lo que limita su implementación en zonas urbanas[114].

Las PTAR pueden transformarse en biofactorías mediante mejoras como automatización, reutilización de agua, digestión anaerobia para generar biogás, recuperación de nutrientes, y tecnologías avanzadas como ANAMMOX e hidrolisis [112].

Algunas plantas de tratamiento de agua residual, han implementado mejoras bajo el marco de la economía circular, mostrando resultados positivos [115]. Sin embargo, debido a la complejidad del manejo de los lodos , no es suficiente hacer algunas mejoras a la PTAR-PTARI, si no que se hace necesario una infraestructura más adecuada para afrontar la problemática de los lodos [115]. Además, se requieren más estudios sobre otros impactos ambientales que causan estas soluciones [115].

Frente a esto, una estrategia de economía circular fuerte para el caso de los lodos residuales domésticos e industriales, es la creación de una biofábrica de lodos [112]. Una instalación especializada para recolectar, tratar y valorizar estos residuos.

Esta planta actuaría como un eslabón esencial entre las PTAR-PTARI y el reúso del lodo en las industrias, asegurando que los lodos cumplan con estándares necesarios para su uso. Así se evitaría la dispersión y fragmentación de usos de lodos.

Así las cosas, podrían implementarse adecuadamente tecnologías de tratamiento para lograr una gestiona totalmente circular.

La biofábrica de lodos, podría implementarse incluso a escala municipal o regional para lodos domésticos e industriales. Esto permitiría reducir la carga operativa de las PTAR -PTARI, alinear la gestión de los lodos con los objetivos de desarrollo sostenible, y cerrar el ciclo del agua residual y el lodo.

C. **Modelo conceptual**

Modelo circular para aprovechamiento de lodos procedentes de plantas de tratamiento de aguas residuales industriales.

Las industrias, en sus procesos productivos, generan aguas residuales que deben ser tratadas para cumplir con las responsabilidades estatales y de protección ambiental [11]. Dicho proceso de descontaminación de aguas se da en plantas especializadas PTARI, la cual cumple la función de mejorar la calidad del agua [11].

Este proceso genera los lodos residuales, que son básicamente la contaminación removida del agua [12]. El manejo de estos, resulta complejo debido a su naturaleza, cantidad generada, volumen ocupado y normatividad limitada [12]. Por ello, para transformar estos lodos, se requiere facilitar su manejo, y controlar su comportamiento. Lo anterior, se logra implementando ciertas tecnologías que lo permiten, y que a su vez sean viables en términos de costos y de logística para la empresa [19].

Ahora bien, un lodo transformado adquiere una cierta versatilidad que facilita la toma de decisiones. Puesto que facilita su movilización y se estabilizan sus componentes, es decir se desactivan los riesgos [26]; siempre y cuando se hayan aplicado los procesos correctos y se tenga un buen respaldo científico y normativo.

Este modelo representado en la figura VI, muestra como el problema alrededor de los lodos mediante la transformación y los principios de la economía circular, puede convertirse en una forma de valorización, reintroduciendo el lodo al ciclo productivo.

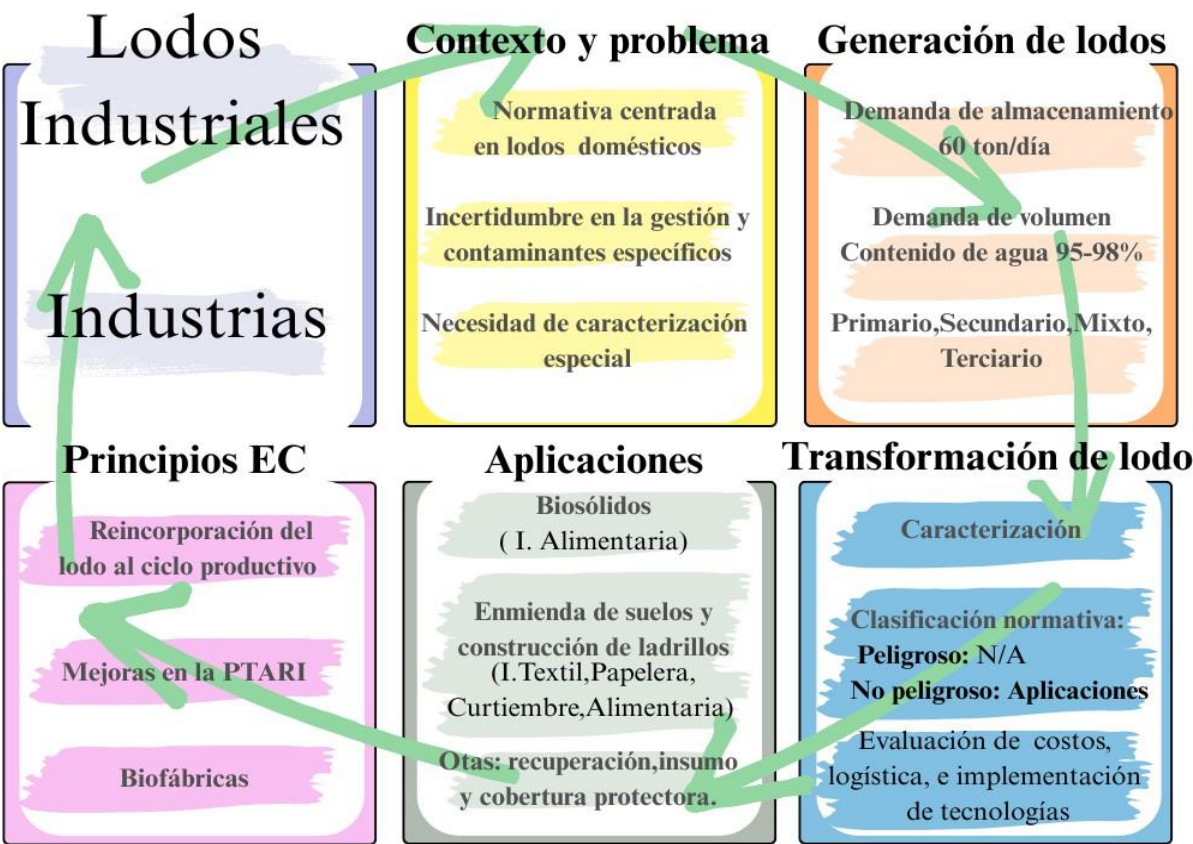


Fig VI.Modelo circular para aprovechamiento de lodos industriales

D. Guía para empresas

En este esquema, se resume el proceso de gestión completo de lodos residuales industriales, lo que facilita a la empresa tener la información base necesaria para gestionar sus lodos, y/o tener información disponible para solucionar problemas o implementar mejoras.

Cabe resaltar que este modelo se puede adaptar a diferentes sectores industriales, diferentes países y diferentes tipos de lodos, lo que brinda una guía generalizada que puede orientar a las empresas con el fin de tener un manejo responsable, eficiente y adaptado a las diferentes necesidades.

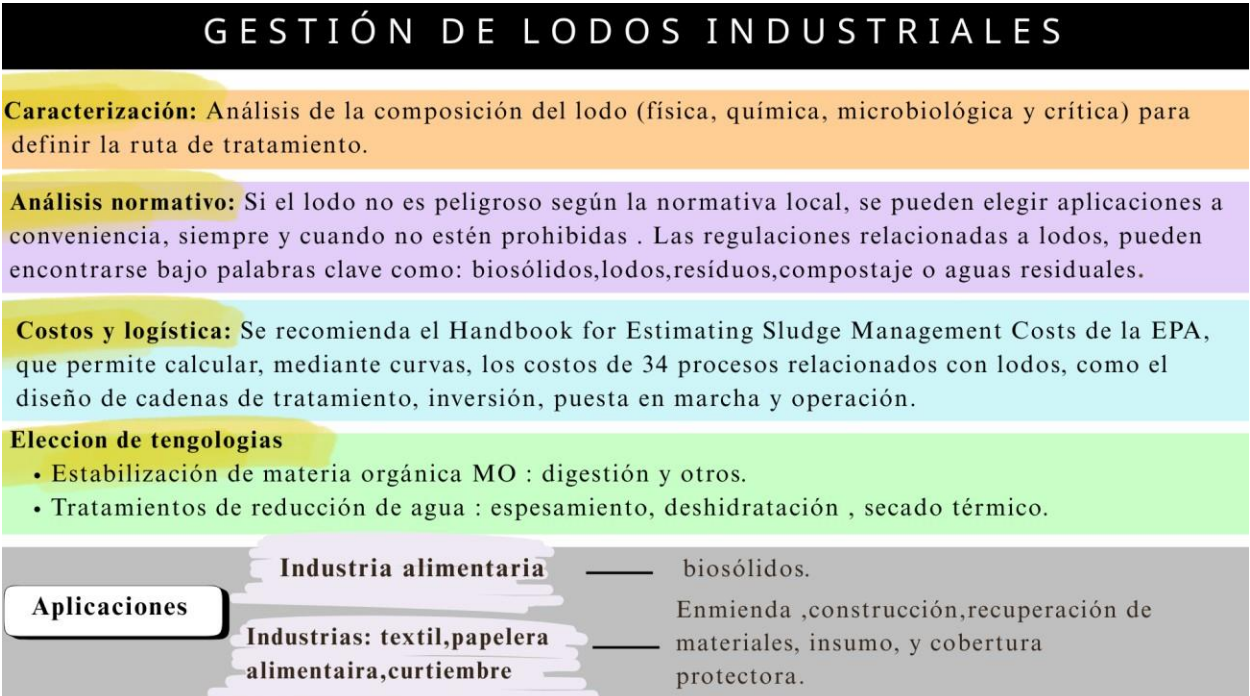


Fig VII.Esquema visual para empresas

VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- La gestión de lodos industriales enfrenta una notable ausencia de normativas específicas, ya que las regulaciones vigentes suelen estar enfocadas en lodos domésticos [26]. Esto genera ambigüedad y riesgos, especialmente ante la presencia de contaminantes no contemplados en marcos actuales, y dificulta la implementación de procesos adecuados [26],[75]. Dada la variabilidad en la composición los lodos, no existe un método único de tratamiento o uso [108]. Es indispensable avanzar en estudios que permitan su adecuada clasificación, trazabilidad y gestión, asegurando así decisiones técnicas responsables y seguras.
- Los impactos ambientales de los lodos industriales se manifiestan principalmente a través de la contaminación difusa, una forma difícil de cuantificar [75]. Esto debido a los cambios en el tiempo, relacionados a la variabilidad, composición y alcance, que dependen del tipo de lodo, su tratamiento y las condiciones del suelo [75]. Los diversos compuestos presentes en estos lodos, pueden ser transportados por el agua o el aire, y transferirse a distintas matrices ambientales [75]. Estos lodos pueden presentar un riesgo considerable tanto para el medio ambiente como la salud pública, ya que pueden contener sustancias tóxicas y persistentes, tales como metales pesados, compuestos orgánicos y contaminantes emergentes [2] ,[27]. Un lodo industrial sin tratamiento es especialmente peligroso, incluso después de ser tratado, aún puede contener compuestos críticos que representen un potencial riesgo [75].

- Se presentó diferentes rutas de manejo según su origen y composición. Se determinó que los lodos industriales alimentarios, por su similitud con los lodos domésticos, pueden acogerse a tecnologías convencionales si cumplen con la normativa de biosólidos vigente del país [12], [26], [30] [31], [32], [33], [34], [35], [36]. Para los lodos industriales no peligrosos principalmente de industrias textiles, papeleras, alimentarias y curtiembre, pero distintos a los domésticos (no cumplen biosólidos), existen opciones como enmienda de suelo y construcción de ladrillos de mampostería[81],[82],[83],[84],[85],[86],[87],[88],[89],[90],[91],[92],[93],[94],[95],[96],[97]; y otras alternativas más generalizadas como insumos para biofloculantes, para elaboración de vidrio, cobertura para relaves mineros o recuperación de materiales como lípidos, proteínas y metales[103],[104],[105],[106],[107],[108],[109],[110],[111]. Los lodos peligrosos, deben acogerse a la normativa de residuos peligrosos del país correspondiente. Estos no aplican para este modelo, a menos que puedan remover o transformar las sustancias problemáticas.
- Mediante la caracterización, análisis de normativa, clasificación de peligrosidad, costos y logística, tratamiento de lodos, análisis de aplicaciones, se logra diseñar la ruta completa de gestión para el lodo industrial. En general Aplicando el manejo correcto, el lodo puede tener la calidad necesaria para diversas aplicaciones [11]. La caracterización en alineación con la normativa del país, es el paso más importante para indicar a qué tipo de manejo puede acogerse el lodo, si a tecnologías convencionales de biosólidos o si requiere aplicaciones específicas u otras alternativas.
- En muchas aplicaciones encontradas, no se detalla adecuadamente el tratamiento previo del lodo, ni las tecnologías implementadas en las etapas iniciales de su manejo, lo cual dificulta la replicabilidad de los resultados. Asimismo, el uso del lodo como enmienda para suelos, puede verse restringido por la presencia de metales pesados[6],[12],[26] coliformes fecales o huevos de helminto. No obstante, a pesar de estos inconvenientes, los estudios revisados muestran que la aplicación de lodo como enmienda de suelo, mejora significativamente las propiedades físicas, químicas y microbiológicas del suelo [26],[92],[93],[94],[97]. Incluso en ciertos casos, se observaron resultados positivos en la producción agrícola. En cuanto a la aplicación de reemplazo de arcilla en la elaboración de ladrillos, se determinó que dicho reemplazo no debe superar el 10%, ya que porcentajes mayores provocan fallas estructurales; una proporción optima que cumple con normativa de mampostería, es del 10% lodo y 90% arcilla, lo que permite reducir costos de construcción y la implementación de lodo como insumo [95].
- La reutilización de lodos y las mejoras en las PTARI son un claro ejemplo de la economía circular [112]. No obstante, la viabilidad del tratamiento y aprovechamiento, depende de factores como el tipo de lodo, espacio disponible, presupuesto de la industria, la existencia de infraestructura

especializada y respaldo normativo [20],[58]. Debido a la complejidad del tratamiento de lodos, el enfoque más eficaz es la creación de biofábricas o parques industriales especializados que integren el tratamiento y la valorización del lodo [112],[114].

REFERENCIAS

- [1] V. Kumar and P. Verma, “Pulp-paper industry sludge waste biorefinery for sustainable energy and value-added products development: A systematic valorization towards waste management,” *J. Environ. Manage.*, vol. 352, p. 120052, Feb. 2024, doi: 10.1016/j.jenvman.2024.120052.
- [2] M. T. Santos and P. A. Lopes, “Sludge recovery from industrial wastewater treatment,” *Sustain. Chem. Pharm.*, vol. 29, p. 100803, Oct. 2022, doi: 10.1016/j.scp.2022.100803.
- [3] E. Uggetti, I. Ferrer, E. Llorens, and J. García, “Sludge treatment wetlands: A review on the state of the art,” *Bioresour. Technol.*, vol. 101, no. 9, pp. 2905–2912, May 2010, doi: 10.1016/j.biortech.2009.11.102.
- [4] “Sistema Costarricense de Información Jurídica.” Accessed: Mar. 07, 2025. [Online]. Available: http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?nValor1=1&nValor2=80715
- [5] R. Gardiner and P. Hajek, “Municipal waste generation, R&D intensity, and economic growth nexus – A case of EU regions,” *Waste Manag.*, vol. 114, pp. 124–135, Aug. 2020, doi: 10.1016/j.wasman.2020.06.038.
- [6] R. Molaey, L. Appels, H. Yesil, A. E. Tugtas, and B. Çalli, “Sustainable heavy metal removal from sewage sludge: A review of bioleaching and other emerging technologies,” *Sci. Total Environ.*, vol. 955, p. 177020, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.scitotenv.2024.177020.
- [7] J. A. Pascual, A. B. Morales, L. M. Ayuso, P. Segura, and M. Ros, “Characterisation of sludge produced by the agri-food industry and recycling options for its agricultural uses in a typical Mediterranean area, the Segura River basin (Spain),” *Waste Manag.*, vol. 82, pp. 118–128, Dec. 2018, doi: 10.1016/j.wasman.2018.10.020.
- [8] L. Nazari, S. Sarathy, D. Santoro, D. Ho, M. B. Ray, and C. (Charles) Xu, “3 - Recent advances in energy recovery from wastewater sludge,” in *Direct Thermochemical Liquefaction for Energy Applications*, L. Rosendahl, Ed., Woodhead Publishing, 2018, pp. 67–100. doi: 10.1016/B978-0-08-101029-7.00011-4.
- [9] A. Arias, G. Feijoo, M. T. Moreira, A. Tukker, and S. Cucurachi, “Advancing waste valorization and end-of-life strategies in the bioeconomy through multi-criteria approaches

- and the safe and sustainable by design framework,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 207, p. 114907, Jan. 2025, doi: 10.1016/j.rser.2024.114907.
- [10] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible; Ministerio de Comercio, Industria y Turismo, “Estrategia Nacional de Economía Circular.” Presidencia de la República de Colombia, 2019. [Online]. Available: <https://responsabilidadintegral.org/Estrategia-Nacional-de-Economia-Circular-Minambiente-2020.pdf>
- [11] L. L. G. Molina and A. M. M. Bermudez, “CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DE LOS LODOS PROVENIENTES DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL DE UNA EMPRESA DE CAFÉ DEL DEPARTAMENTO DE CALDAS,” *Univ. Católica Manizales*, p. 116, 2016.
- [12] “Lodos de depuración de aguas residuales,” Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Accessed: Mar. 07, 2025. [Online]. Available: <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/prevencion-y-gestion-residuos/flujos/lodos-depuradora.html>
- [13] Y. Secretaría de Estado de Cambio Climático, Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino, Consejo de Ministros de España., “Resolución de 20 de enero de 2009, de la Secretaría de Estado de Cambio Climático, por la que se publica el Acuerdo de Consejo de Ministros por el que se aprueba el Plan Nacional Integrado de Residuos para el período 2008-2015.” *Boletín Oficial del Estado (BOE)*., Feb. 26, 2009. [Online]. Available: <https://www.boe.es/boe/dias/2009/02/26/pdfs/BOE-A-2009-3243.pdf>
- [14] COLOMBIA POTENCIA DE LA VIDA, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Ministerio de agricultura, and Ministerio de vivienda de Colombia, “Propuesta de modificación del Decreto 1287 de 2014 ‘Por el cual se establecen las condiciones y criterios para el uso de los biosólidos generados en plantas de tratamientos de aguas residuales municipales’ 1 .” Diciembre de 2023. [Online]. Available: <https://www.minvivienda.gov.co/system/files/consultasp/documento-soporte-modificacion-biosolidos-version-final-diciembre-de-2023.pdf>
- [15] B. del C. Nacional, “Biblioteca del Congreso Nacional | Ley Chile,” www.bcn.cl/leychile. Accessed: Mar. 07, 2025. [Online]. Available: <https://www.bcn.cl/leychile>
- [16] “(PDF) Wastewater sludge characteristics, treatment techniques and energy production.” Accessed: Mar. 07, 2025. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/354403708_WASTEWATER_SLUDGE_CHARACTERISTICS_TREATMENT_TECHNIQUES_AND_ENERGY_PRODUCTION#fullText

FileContent

- [17] R. Arancon, C. Lin, T. H. Kwan, and R. Luque, “Advances on waste valorization: New horizons for a more sustainable society,” *Energy Sci. Eng.*, vol. 1, Sep. 2013, doi: 10.1002/ese3.9.
- [18] A. Banaszewska, F. Cruijssen, G. D. H. Claassen, and J. G. A. J. van der Vorst, “Effect and key factors of byproducts valorization: The case of dairy industry,” *J. Dairy Sci.*, vol. 97, no. 4, pp. 1893–1908, Apr. 2014, doi: 10.3168/jds.2013-7283.
- [19] “Sludge Thickening - an overview | ScienceDirect Topics.” Accessed: Mar. 07, 2025. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/topics/chemical-engineering/sludge-thickening>
- [20] J.-P. Schöggli, L. Stumpf, and R. J. Baumgartner, “The narrative of sustainability and circular economy - A longitudinal review of two decades of research,” *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 163, p. 105073, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.resconrec.2020.105073.
- [21] E. Sánchez-García, J. Martínez-Falcó, B. Marco-Lajara, and E. Manresa-Marhuenda, “Revolutionizing the circular economy through new technologies: A new era of sustainable progress,” *Environ. Technol. Innov.*, vol. 33, p. 103509, Feb. 2024, doi: 10.1016/j.eti.2023.103509.
- [22] *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery*. Accessed: Jun. 06, 2025. [Online]. Available: <https://www.mheducation.com/highered/product/Wastewater-Engineering-Treatment-and-Resource-Recovery-Metcalf-and-Eddy.html>
- [23] Alianza por el agua, “MONOGRÁFICOS AGUA EN CENTRO AMÉRICA .MANUAL DE DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES URBANAS.” Ideasmares, 2023. [Online]. Available: <https://hispagua.cedex.es/documentacion/documento/32891>
- [24] “Fiscalización Ambiental en Aguas Residuales | SINIA.” Accessed: Jun. 06, 2025. [Online]. Available: <https://sinia.minam.gob.pe/documentos/fiscalizacion-ambiental-aguas-residuales>
- [25] “Estación depuradora de aguas residuales (EDAR),” Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Accessed: Jun. 06, 2025. [Online]. Available: <https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/saneamiento-depuracion/sistemas/edar.html>
- [26] M. A. Montes-Morán and J. A. Menéndez, “El problema de la gestión de lodos en EDARs,” 2010, pp. 101–138.
- [27] I. Mantis, D. Voutsas, and C. Samara, “Assessment of the environmental hazard from municipal and industrial wastewater treatment sludge by employing chemical and

- biological methods,” *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, vol. 62, no. 3, pp. 397–407, Nov. 2005, doi: 10.1016/j.ecoenv.2004.12.010
- [28] “Estudio de la prevención de la contaminación de lodos de depuración por actividades industriales,” Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Accessed: Jun. 06, 2025. [Online]. Available: <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/publicaciones/estudio-prevencion-contaminacion-lodos-depuracion-actividades-industriales.html>
- [29] *Directiva 86/278/CEE del Consejo de 12 de junio de 1986 relativa a la protección del medio ambiente y, en particular, de los suelos, en la utilización de los lodos de depuradora en agricultura*, vol. 181. 1986. Accessed: Jun. 06, 2025. [Online]. Available: <http://data.europa.eu/eli/dir/1986/278/oj/spa>
- [30] D. C. Miño Brazzero, “Compostaje de los lodos procedentes de la industria de alimentos y evaluación de la calidad agronómica del compost para su empleo en la restauración de suelos erosionados,” Sep. 2022, Accessed: Jun. 06, 2025. [Online]. Available: <http://dspace.umh.es/handle/11000/28343>
- [31] “NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-004-SEMARNAT-2002.” Accessed: Jun. 06, 2025. [Online]. Available: <https://siga.jalisco.gob.mx/assets/documentos/normatividad/nom004semarnat2002.htm>
- [32] UNIVERSIDAD IBERO AMERICANA CDMX, “GUÍA PARA LA IDENTIFICACIÓN DE RESIDUOS PELIGROSOS.” Colibrí Soluciones Ambientales S.A., 2022. [Online]. Available: <https://sustentable.iberomexico.mx/assets/documentos/sma/guia-para-la-identificacion-de-residuos-peligrosos.pdf>
- [33] “(PDF) European Union legislation on sewage sludge management.” Accessed: Jun. 06, 2025. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/261365754_European_Union_legislation_on_sewage_sludge_management
- [34] Pérez Rocamora, Esteban; Larrañaga, Gabriela; Caro, Santana., “LODOS GENERADOS EN PLANTAS DE TRATAMIENTO DE EFLUENTES DOMÉSTICOS OPERADAS POR OSE. CARACTERIZACIÓN Y CUANTIFICACIÓN.” AIDIS URUGUAY - ASOCIACIÓN INTERAMERICANA DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL, 2017.
- [35] N. C. Acuña Molina, “Valorización de lodos residuales de la producción de Sulfato de Manganeso en Quintal S.A.,” 2008, Accessed: Jun. 06, 2025. [Online]. Available:

- <http://repositorio.uac.edu.co/handle/11619/1373>
- [36] “DECRETO 1287 DE 2014.” Accessed: Jun. 06, 2025. [Online]. Available: <https://www.suin-juriscol.gov.co/viewDocument.asp?id=1259502>
- [37] J. Escobar, Pereira, Y. Martinez, and N. Sánchez, *EVALUACIÓN DE LA FITOTOXICIDAD DE LODOS RESIDUALES DE INDUSTRIAS ALIMENTICIAS Y PAPELERAS*. 2012. doi: 10.13140/2.1.3001.6007.
- [38] “40 CFR Part 261 -- Identification and Listing of Hazardous Waste.” Accessed: Jun. 07, 2025. [Online]. Available: <https://www.ecfr.gov/current/title-40/part-261>
- [39] “Decreto 4741 de 2005 - Gestor Normativo.” Accessed: Jun. 07, 2025. [Online]. Available: <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=18718>
- [40] “Report 2008.” Accessed: Jun. 07, 2025. [Online]. Available: https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe_2008_ing/07_residuos/cap7_3.html
- [41] E. Bautista-Vargas, A. Benavides-Mendoza, M. Rodríguez, J. Gonzalez Fuentes, V. Robledo-Torres, and A. Sandoval Rangel, “Lodo industrial textil en la producción de hortensias (*Hydrangea macrophylla* L.) en maceta,” *Rev. Mex. Cienc. Agríc.*, p. 2359, Jan. 2018, doi: 10.29312/remexca.v0i12.767.
- [42] D. Ivan, R. Calderón, A. Gualtero, D. Acosta, and I. Rojas, “Tratamientos para la Remoción de Metales Pesados Comúnmente Presentes en Aguas Residuales Industriales. Una Revisión,” *Ing. Región*, vol. 13, p. 73, Sep. 2015, doi: 10.25054/22161325.710.
- [43] “(PDF) Microbiología en la puesta en marcha de un biorreactor de membranas (MBR) para la depuración de aguas residuales urbanas.” ResearchGate. Accessed: Jun. 07, 2025. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/236217664_Microbiologia_en_la_puesta_en_marcha_de_un_biorreactor_de_membranas_MBR_para_la_depuracion_de_aguas_residuales_urbanas
- [44] Nataly Broche Hernández, “Caracterización físico-química y microbiológica de lodos residuales y propuesta de tratamiento con CBQ-Biorrem®.” Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Oct. 2020. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/349057901_Caracterizacion_fisico-quimica_y_microbiologica_de_lodos_residuales_y_propuesta_de_tratamiento_con_CBQ-BiorremR#fullTextFileContent
- [45] Jaidith Marisol Ramos RincónAngye BermudezTania Rojas, “Contaminación

- odorífera: causas, efectos y posibles soluciones a una contaminación invisible.” *Revista de Investigación Agraria y Ambiental (RIAA)*, Feb. 2018.
- [46] A. D. Cota-Espericueta and C. Ponce-Corral, “Eliminación de bacterias patógenas en lodos residuales durante el secado solar,” *Rev. Int. Contam. Ambient.*, vol. 24, no. 4, pp. 161–170, Nov. 2008.
- [47] A. Chaqroun *et al.*, “Assessing infectivity of emerging enveloped viruses in wastewater and sewage sludge: Relevance and procedures,” *Sci. Total Environ.*, vol. 943, p. 173648, Sep. 2024, doi: 10.1016/j.scitotenv.2024.173648.
- [48] C.-D. Dong, J.-W. Cheng, C.-W. Chen, C.-P. Huang, and C.-M. Hung, “Activation of calcium peroxide by nitrogen and sulfur co-doped metal-free lignin biochar for enhancing the removal of emerging organic contaminants from waste activated sludge,” *Bioresour. Technol.*, vol. 374, p. 128768, Apr. 2023, doi: 10.1016/j.biortech.2023.128768.
- [49] I. Vázquez-Tapia *et al.*, “Occurrence of emerging organic contaminants and endocrine disruptors in different water compartments in Mexico – A review,” *Chemosphere*, vol. 308, p. 136285, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.chemosphere.2022.136285.
- [50] E. de la P. de Torres and Ó. H. Felipe, “Evaluación toxicológica de residuos orgánicos Toxicological evaluation of organic residues,” *Rev. Salud Ambient.*, vol. 5, no. 2, pp. 142–151, Dec. 2005.
- [51] “Title 40 of the CFR -- Protection of Environment.” Accessed: Jun. 07, 2025. [Online]. Available: <https://www.ecfr.gov/current/title-40>
- [52] “40 CFR Part 503 -- Standards for the Use or Disposal of Sewage Sludge.” Accessed: Jun. 07, 2025. [Online]. Available: <https://www.ecfr.gov/current/title-40/part-503>
- [53] “40 CFR Part 257 -- Criteria for Classification of Solid Waste Disposal Facilities and Practices.” Accessed: Jun. 07, 2025. [Online]. Available: <https://www.ecfr.gov/current/title-40/part-257>
- [54] “DECRETO 1287 DE 2014.” Accessed: Jun. 07, 2025. [Online]. Available: <https://www.suin-juriscol.gov.co/viewDocument.asp?id=1259502>
- [55] Subdirección de salud ambiental, “AGUA, SANEAMIENTO BÁSICO, Y GESTIÓN INTEGRAL DE RESIDUOS GENERADOS EN LA ATENCIÓN EN SALUD Y OTRAS ACTIVIDADES.” MINISTERIO DE SALUD Y PROTECCIÓN SOCIAL DE COLOMBIA, Nov. 2022. [Online]. Available:

<https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/VS/PP/SA/abece-agua-saneamiento.pdf>

- [56] Vassilis J. InglezakisVassilis J. InglezakisAntonis A ZorpasAntonis A ZorpasAvraam KaragiannidisAvraam KaragiannidisShow all 6 authorsStella SklariStella Sklari, “European Union legislation on sewage sludge management.” Fresenius Environmental Bulletin, Jan. 2014. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/261365754_European_Union_legislation_on_sewage_sludge_management#fullTextFileContent
- [57] Instituto Nacional de Normalización (INN), “Compost – Clasificación y requisitos.” 2005.
- [58]: “Handbook estimating sludge management.” Accessed: Jun. 07, 2025. [Online]. Available: <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyNET.exe/30004B0L.TXT?ZyActionD=ZyDocument&Client=EPA&Index=1981+Thru+1985&Docs=&Query=&Time=&EndTime=&SearchMethod=1&TocRestrict=n&Toc=&TocEntry=&QField=&QFieldYear=&QFieldMonth=&QFieldDay=&IntQFieldOp=0&ExtQFieldOp=0&XmlQuery=&File=D%3A%5Czyfiles%5CIndex%20Data%5C81thru85%5CTxt%5C00000003%5C30004B0L.txt&User=ANONYMOUS&Password=anonymous&SortMethod=h%7C-&MaximumDocuments=1&FuzzyDegree=0&ImageQuality=r75g8/r75g8/x150y150g16/i425&Display=hpfr&DefSeekPage=x&SearchBack=ZyActionL&Back=ZyActionS&BackDesc=Results%20page&MaximumPages=1&ZyEntry=1&SeekPage=x&ZyPURL>
- [59] Departamento de Salud Pública del Condado de San Luis Obispo, Servicios de Salud Ambiental, “Aguas Residuales Tratadas Lodo/ Biosolidos Y Aplicación en el Suelo En el Condado de San Luis.” [Online]. Available: https://www.slocounty.ca.gov/departments/health-agency/public-health/environmental-health-services/forms-documents/reference-materials/biosolids-land-application-reference-materials/llgeneral_public_spanish#:~:text=Cuando%20el%20lodo%20ha%20sido,combinadas%20en%20muchas%20diferentes%20maneras
- [60] M.M. Vilaseca, “OBSERVACIÓN MICROSCÓPICA DE FANGOS ACTIVADOS EN LOS TRATAMIENTOS DE DEPURACIÓN BIOLÓGICA.” BOLETÍN INTEXTER

- (U.P.C.) 2001.
Nº 119, 2001. [Online]. Available:
<https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099/1726/TREBALL8.pdf>
- [61] “(PDF) Biología de los Microorganismos- Brock - 14 Edición.” Accessed: Jun. 07, 2025. [Online]. Available:
https://www.academia.edu/42224816/Biolog%C3%ADa_de_los_Microorganismos_Brock_14_Edici%C3%B3n?auto=download
- [62] Darío Naranjo Fernández., *Lodo residual fresco de una planta de de tratamiento en Colombia*. 2025.
- [63] Adriana Laca Pérez, Amanda Laca, Mario Díaz Fernández, “PRODUCCIÓN Y CARACTERÍSTICAS DE LODOS.” Universidad de Oviedo, 2018. [Online]. Available:
<https://digibuo.uniovi.es/dspace/bitstream/handle/10651/50969/Laca18%20META%20Produccion%20y%20caracteristicas.pdf;jsessionid=0D59A023DEA812C20AAE9084320BF60E?sequence=1>
- [64] Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio de Colombia, “Fichas de tecnologías de tratamiento de lodos.” Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio de Colombia, 2021. [Online]. Available:
<https://www.minvivienda.gov.co/sites/default/files/documentos/anexo-3-tecnologias-de-tratamiento-de-lodos.pdf>
- [65] Comisión Nacional del Agua (CONAGUA); Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), “Manual de Agua Potable Alcantarillado y Saneamiento: Operación y mantenimiento de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales: Tratamiento y disposición de lodos.” Méxcio Gobierno de la república. [Online]. Available:
<https://files.conagua.gob.mx/conagua/mapas/SGAPDS-1-15-Libro50.pdf>
- [66] A. K. Venkatesan and R. U. Halden, “Wastewater treatment plants as chemical observatories to forecast ecological and human health risks of manmade chemicals,” *Sci. Rep.*, vol. 4, p. 3731, Jan. 2014, doi: 10.1038/srep03731.

- [67] “Estudio de la prevención de la contaminación de lodos de depuración por actividades industriales,” Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Accessed: Jun. 07, 2025. [Online]. Available: <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/publicaciones/estudio-prevencion-contaminacion-lodos-depuracion-actividades-industriales.html>
- [68] “Bifenilos policlorados (PCB),” Agencia Catalana de Seguridad Alimentaria. Accessed: Jun. 07, 2025. [Online]. Available: <http://acsa.gencat.cat/es/detall/article/Bifenilos-policlorados-PCB>
- [69] “Di(2-Ethylhexyl)Phthalate (DEHP) | ToxFAQs™ | ATSDR.” Accessed: Jun. 07, 2025. [Online]. Available: <https://wwwn.cdc.gov/TSP/ToxFAQs/ToxFAQsDetails.aspx?faqid=377&toxid=65>
- [70] EPA, “Preguntas y respuestas: Regulación Primaria Nacional de PFAS para el Agua Potable.” Q&A, 2024. [Online]. Available: <https://www.epa.gov/sdwa/additional-supporting-materials-final-pfas-npdwr>
- [71] Rodolfo FreresOlivia HenríquezCarmen Paz Castro CorreaCarmen Paz Castro Correa, “Posibilidades de aplicación de lodos o biosólidos a los suelos del sector norte de la Región Metropolitana de Santiago.” *Revista de geografía Norte Grande*, 2007. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/26496220_Posibilidades_de_aplicacion_de_lodos_o_biosolidos_a_los_suelos_del_sector_norte_de_la_Region_Metropolitana_de_Santiago#fullTextFileContent
- [72] J. L. Santos *et al.*, “Presence of organic pollutants in sludge from anaerobic wastewater stabilization ponds,” *Desalination Water Treat.*, vol. 4, no. 1, pp. 116–121, Apr. 2009, doi: 10.5004/dwt.2009.365.
- [73] S. Ishaq *et al.*, “Heavy metal toxicity arising from the industrial effluents repercussions on oxidative stress, liver enzymes and antioxidant activity in brain homogenates of *Oreochromis niloticus*,” *Sci. Rep.*, vol. 13, no. 1, p. 19936, Nov. 2023, doi: 10.1038/s41598-023-47366-4.
- [74] EurEau (European Federation of National Associations of Water Services), “Briefing note on Sludge and the circular economy — the impact of PFAS.” EurEau, Jul. 27, 2022. [Online]. Available: [https://www.eureau.org/resources/briefing-notes/6718-briefing-note-on-sludge-and-the-circular-economy-the-impact-of-pfas/file#:~:text=The%20application%20and%20the%20reuse,that%20contribute%20to%](https://www.eureau.org/resources/briefing-notes/6718-briefing-note-on-sludge-and-the-circular-economy-the-impact-of-pfas/file#:~:text=The%20application%20and%20the%20reuse,that%20contribute%20to%20)

20soil%20contamination.

- [75] Rodríguez Eugenio, N., McLaughlin, M., Pennock, D., and Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), “LA CONTAMINACION DEL SUELO: UNA REALIDAD OCULTA.” ALIANZA MUNDIAL POR EL SUELO, 2019. [Online].
Available: <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/7d70ca8d-7503-4839-8d6b-8250e9add8ac/content>
- [76] A. Grobelak *et al.*, “Environmental Impacts and Contaminants Management in Sewage Sludge-to-Energy and Fertilizer Technologies: Current Trends and Future Directions,” *Energies*, vol. 17, no. 19, Art. no. 19, Jan. 2024, doi: 10.3390/en17194983.
- [77] C. del M. López Pinto, “Cuantificación de lodos generados en la industria de curtiembres y evaluación impacto ambiental asociado a su actual disposición final - Jurisdicción CAR,” 2002, Accessed: Jun. 07, 2025. [Online]. Available: <https://hdl.handle.net/20.500.14625/21892>
- [78] M. Haroun, A. Idris, and S. R. Syed Omar, “A study of heavy metals and their fate in the composting of tannery sludge,” *Waste Manag.*, vol. 27, no. 11, pp. 1541–1550, Jan. 2007, doi: 10.1016/j.wasman.2006.09.006.
- [79] Grupo Carlos García, CEBAS-CSIC, “https://ecodes.org/images/quehacemos/pdf_MITECO_2019/Reciclado_en_suelos_de_enmiendas_organicas.pdf.” ECODES — Fundación Ecología y Desarrollo, Nov. 2019. [Online]. Available: https://ecodes.org/images/quehacemos/pdf_MITECO_2019/Reciclado_en_suelos_de_enmiendas_organicas.pdf
- [80] JuanAlbertoVélez Zuluaga, “Los biosólidos: ¿una solución o un problema?” nvestigación financiada con recursos del Contrato OB 1008600 y 1008601 de junio de 2007 entre Empresas Públicas de Medellín E.S.P y la Universidad Nacional de Colombia,sede Medellín y del Fondo de Fomento a la Investigación de la Corporación Universitaria Lasallista, 2007. [Online]. Available: <https://repository.unilasallista.edu.co/server/api/core/bitstreams/4a286a6b-2311-4bc0-8f87-465822a8dec9/content>
- [81] Á. I. Piedra Mora, “Propuesta para el manejo de lodos residuales de la planta de tratamiento de la empresa Fabrinorte, cantón Otavalo,” bachelorThesis, 2020. Accessed: Jun. 07, 2025. [Online]. Available: <https://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/10593>
- [82] W. A. Narváez-Ortiz, A. Benavides-Mendoza, V. Robledo-Torres, and R. Mendoza-Villarreal, “Efectividad del lodo textil en la producción y composición química del fruto

- de tomate,” *Rev. Mex. Cienc. Agríc.*, vol. 4, no. 1, Art. no. 1, May 2018, doi: 10.29312/remexca.v4i1.1264.
- [83] E. Bautista-Vargas, A. Benavides-Mendoza, M. de las N. R. Mendoza, J. A. G.- Fuentes, V. Robledo-Torres, and A. Sandoval-Rangel, “Lodo industrial textil en la producción de hortensias (*Hydrangea macrophylla* L.) en maceta,” *Rev. Mex. Cienc. Agríc.*, no. 12, Art. no. 12, Jan. 2018, doi: 10.29312/remexca.v0i12.767.
- [84] H. P. Chuquimamani Arapa, “Evaluación del proceso de compostaje de lodos provenientes del tratamiento de aguas residuales de la Industria Textil.”
- [85] W. A. Narváez-Ortíz, A. Benavides-Mendoza, M. E. Vázquez-Badillo, and M. Cabrera-De La Fuente, “Efecto de la aplicación de lodos crudos de la industria textil en la productividad y en la composición química de lechuga (*Lactuca sativa*),” *Rev. Int. Contam. Ambient.*, vol. 30, no. 4, pp. 379–391, 2014.
- [86] D. J. Benavides Guerra, “Diseño e implementación de un mecanismo para compostaje de lodos provenientes de plantas de tratamiento de agua residuales de industria textiles,” bachelorThesis, Quito: Universidad de las Américas, 2015, 2015. Accessed: Jun. 08, 2025. [Online]. Available: <http://dspace.udla.edu.ec/handle/33000/4182>
- [87] D. A. Benalcázar Chapi, “Análisis de las propiedades mecánicas de ladrillos prensados elaborados con arcilla y lodos residuales textiles, cumpliendo la norma técnica ecuatoriana (NTE INEN 3049),” bachelorThesis, Quito, 2020., 2020. Accessed: Jun. 08, 2025. [Online]. Available: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/21286>
- [88] N. Loaiza Cordero, “Caracterización fisicoquímica de los lodos generados en los procesos productivos y unidades de tratamiento de las aguas residuales no domésticas de las curtiembres del barrio San Benito en Bogotá D.C.,” Oct. 2020, Accessed: Jun. 08, 2025. [Online]. Available: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/78656>
- [89] J. A. Santos, L. A. P. L. Nunes, W. J. Melo, and A. S. F. Araújo, “Tannery sludge compost amendment rates on soil microbial biomass of two different soils,” *Eur. J. Soil Biol.*, vol. 47, no. 2, pp. 146–151, Mar. 2011, doi: 10.1016/j.ejsobi.2011.01.002.
- [90] J. D. C. Silva *et al.*, “Effect of different tannery sludge compost amendment rates on growth, biomass accumulation and yield responses of *Capsicum* plants,” *Waste Manag.*, vol. 30, no. 10, pp. 1976–1980, Oct. 2010, doi: 10.1016/j.wasman.2010.03.011.
- [91] M. G. Vicencio-De La Rosa, M. E. Pérez-López, E. Medina-Herrera, and M. A. Martínez- Prado, “Producción de composta y vericomposta a partir de los lodos de la planta de tratamiento de aguas residuales de un rastro,” *Rev. Int. Contam. Ambient.*, vol. 27, no. 3,

- pp. 263–270, Aug. 2011.
- [92] D. C. Miño Brazzero, “Compostaje de los lodos procedentes de la industria de alimentos y evaluación de la calidad agronómica del compost para su empleo en la restauración de suelos erosionados,” Sep. 2022, Accessed: Jun. 08, 2025. [Online]. Available: <http://dspace.umh.es/handle/11000/28343>
- [93] E. Arqueros, R. Morales-Vera, R. R. Roco, and A. Gonzalez, “Utilización de lodos residuales en el compostaje de orujos y escobajo en la industria vitivinícola,” *BIO Web Conf.*, vol. 56, p. 01031, 2023, doi: 10.1051/bioconf/20235601031.
- [94] FRANCY YADIRA AVENDAÑO CARDENAS and JHON ALEXANDER MARTINEZ GONZALEZ, “RECUPERACIÓN DE LODOS DE LAS LAGUNAS DE OXIDACIÓN PROVENIENTES DEL PROCESO DE EXTRACCIÓN DE ACEITE DE PALMA, PARA USAR COMO ABONO EN CULTIVOS DE PALMA AFRICANA.” Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD), de enero de 2015. [Online]. Available: <https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/3823/91530880.pdf;jsessionid=17D681E6D776B4F9E9CD7F11A811FAB3?sequence=3>
- [95] L. N. Rincón Carreño, “Aprovechamiento de los lodos de planta de tratamiento de aguas residuales en empresa láctea, municipio de Cogua,” May 2019, Accessed: Jun. 08, 2025. [Online]. Available: <https://hdl.handle.net/20.500.11839/7455>
- [96] A. R. Romero-Conrado, E. A. Suárez Agudelo, M. A. Macias Jimenez, Y. Gómez Charris, and L. P. Lozano Ayarza, “Diseño experimental para la obtención de compost apto para uso agrícola a partir de lodo papeler Kraft,” 2017, Accessed: Jun. 08, 2025. [Online]. Available: <https://hdl.handle.net/11323/2235>
- [97] J. V. Barbachán, “Compostaje del residuo papeler aplicado al cultivo de maíz,” *Rev. Alfa*, vol. 5, no. 15, Art. no. 15, Dec. 2021, doi: 10.33996/revistaalfa.v5i15.135.
- [98] Rosa María Ramírez Zamora, Fabricio Espejel Ayala 2, and Ma. Neftalí Rojas-Valencia 3, “USO DE LODOS DE LA INDUSTRIA PAPELERA PARA LA SÍNTESIS DE ZEOLITAS.” Universidad Nacional Autónoma de México, Jul. 2019. [Online]. Available: <https://aidisnet.org/wp-content/uploads/2019/07/261-M%C2%AEExico-oral.pdf>
- [99] B. B. Corredor, G. P. Mesa, S. A. C. Gallo, and N. Pino, “Biorremediación de suelo contaminado con pesticidas: caso DDT,” *Gest. Ambiente*, vol. 16, no. 3, Art. no. 3, Sep. 2013.
- [100] S. Herrera, “AGRO PRODUCTIVIDAD”, Accessed: Jun. 08, 2025. [Online].

Available: https://www.academia.edu/34438829/AGRO_PRODUCTIVIDAD

- [101] J. A. Romero Rojas and G. Arévalo León, “Compostaje de grasas y lodos generados en ‘PTAR,’” *Rev. Esc. Colomb. Ing.*, vol. 8, no. 30, pp. 19–25, 1998.
- [102] O. US EPA, “A Plain English Guide to the EPA Part 503 Biosolids Rule.” Accessed: Jun. 08, 2025. [Online]. Available: <https://www.epa.gov/biosolids/plain-english-guide-epa-part-503-biosolids-rule>
- [103] A. R. Aboulela, A. A. Mussa, M. Talhami, P. Das, and A. H. Hawari, “Industrial sludge valorization and decontamination via lipid extraction and heavy metals removal using low-cost protic ionic liquid,” *Sci. Total Environ.*, vol. 835, p. 155451, Aug. 2022, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.155451.
- [104] J. Du *et al.*, “Complete recycling of valuable metals from electroplating sludge: Green and selective recovery of chromium,” *Chem. Eng. J.*, vol. 467, p. 143484, Jul. 2023, doi: 10.1016/j.cej.2023.143484.
- [105] A. Taghvaie Nakhjiri, H. Sanaeepur, A. Ebadi Amooghin, and M. M. A. Shirazi, “Recovery of precious metals from industrial wastewater towards resource recovery and environmental sustainability: A critical review,” *Desalination*, vol. 527, p. 115510, Apr. 2022, doi: 10.1016/j.desal.2021.115510.
- [106] J. Ge, H. Tian, L. Li, Y. Han, and J. Liu, “Preparation of a novel organic-inorganic composite sludge bioflocculant (SBF) from dewatered sludge as raw material: Characteristics, flocculation mechanism and application for domestic sewage,” *Bioresour. Technol.*, vol. 416, p. 131747, Jan. 2025, doi: 10.1016/j.biortech.2024.131747.
- [107] Y.-Z. Huang, Y.-Y. Lee, C. Fan, and Y.-C. Chung, “Recycling of domestic sludge cake as the inoculum of anaerobic digestion for kitchen waste and its benefits to carbon negativity,” *J. Environ. Manage.*, vol. 370, p. 122863, Nov. 2024, doi: 10.1016/j.jenvman.2024.122863.
- [108] L. Świerczek, B. M. Cieřlik, and P. Konieczka, “The potential of raw sewage sludge in construction industry – A review,” *J. Clean. Prod.*, vol. 200, pp. 342–356, Nov. 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.07.188.
- [109] M. M. Roy, A. Dutta, K. Corscadden, P. Havard, and L. Dickie, “Review of biosolids management options and co-incineration of a biosolid-derived fuel,” *Waste Manag.*, vol. 31, no. 11, pp. 2228–2235, Nov. 2011, doi: 10.1016/j.wasman.2011.06.008.
- [110] Y. Jia, P. Nason, C. Maurice, L. Alakangas, and B. Öhlander, “Investigation of biosolids degradation under flooded environments for use in underwater cover designs for mine tailing remediation,” *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 22, no. 13, pp. 10047–

- 10057, Jul. 2015, doi: 10.1007/s11356-015-4131-5.
- [111] M. K. Al-Lami, N. Oustriere, E. Gonzales, and J. G. Burken, “Phytomanagement of Pb/Zn/Cu tailings using biosolids-biochar or -humus combinations: Enhancement of bioenergy crop production, substrate functionality, and ecosystem services,” *Sci. Total Environ.*, vol. 836, p. 155676, Aug. 2022, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.155676.
- [112] Núcleo de Bibliotecas de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso (NBC PUCV), “Guía de Economía Circular en Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales.” Núcleo de Bibliotecas, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Agosto 2024. [Online]. Available: <https://nbcpucv.cl/wp-content/uploads/2024/11/Guia-EC-2024.pdf>
- [113] Mukherjee, K., Trieb, J., Niegowska Conforti, M., Di Martino, M., Fattori, V. & Lipp, M., “Exploring the future landscape of new food sources and production systems — A foresight exercise.” Food Safety Foresight Programme, FAO (Food and Agriculture Organization of the UN), abril de 2025. [Online]. Available: <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/3e73e569-c6da-4067-ad0b-5b378a05ecd0/content>
- [114] EPA, “Folleto informativo de tecnología de aguas residuales Zanjas de oxidación.” 2000. [Online]. Available: https://www3.epa.gov/npdes/pubs/cs_00_013.pdf
- [115] M. F. Furness, R. Bello-Mendoza, L. P. Güereca, and R. Chamy Maggi, “The biofactories: Quantifying environmental benefits of the wastewater circular economy in Chile using life cycle assessment,” *Circ. Econ.*, vol. 3, no. 3, p. 100091, Sep. 2024, doi: 10.1016/j.cec.2024.100091.

ANEXOS

Fuentes recomendadas para profundizar en las tecnologías para estabilización de lodos y tratamientos de reducción de agua:

- WastewaterEngineeringTreatment and Resource Recovery [22] .
- Reglamento Técnico de Agua y Saneamiento Básico – RAS Título E - TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES de Colombia [64].
- Repositorio Institucional de la universidad de Antioquia
- Titulo 40 CFR de la EPA 501-503 .
- Manual de Agua Potable Alcantarillado y Saneamiento: Operación y mantenimiento de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales: tratamiento y disposición de lodos [65].