

Evaluación de estabilización de lodos residuales provenientes de la laguna de oxidación del cantón Bolívar, Manabí, Ecuador

Evaluation of the stabilization of residual sludge from the oxidation lagoon of the Bolívar canton, Manabí, Ecuador

Avaliação da estabilização de lodos residuais provenientes da lagoa de oxidação do cantão Bolívar, Manabí, Equador

Received: 08/09/2025 | Revised: 08/19/2025 | Accepted: 08/20/2025 | Published: 08/22/2025

David Robalino

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-0322-8384>

Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí "Manuel Félix López". Ingeniería Ambiental, Ecuador
E-mail: jorge.robolino@espam.edu.ec

Enzo Poveda

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-2711-6838>

Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí "Manuel Félix López". Ingeniería Ambiental, Ecuador
E-mail: @espam.edu.ec

Carlos Banchón

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0388-1988>

Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí "Manuel Félix López". Ingeniería Ambiental, Ecuador
E-mail: carlos.banchon@espam.edu.ec

Resumen

El presente estudio tiene como objetivo evaluar las características de los lodos residuales generados del tratamiento de efluentes, con especial atención a casos de estudio como el de las lagunas de oxidación del cantón Bolívar, provincia de Manabí, Ecuador. Se llevó a cabo un análisis sistemático de la bibliografía científica publicada entre el año 2000 y el 2025, empleando bases de datos como Google Scholar, ScienceDirect, Scopus y Springer, con el objetivo de valorar técnicas de estabilización como el compostaje, la digestión anaerobia y el tratamiento químico. Los hallazgos resaltan el compostaje como un método eficaz para la estabilización de lodos, siempre y cuando se mantenga la relación de carbono/nitrógeno (C/N) y el pH. Esto facilita la disminución de agentes patógenos y la producción de subproductos valiosos como abonos. El análisis fisicoquímico de los lodos de Ecuador reveló un pH neutro (7.2), una elevada conductividad eléctrica (1.51 S/cm) y un contenido fluctuante de materia orgánica (3.8%), lo que los distingue de los lodos de naciones como Colombia (pH 12.7) o Alemania (materia orgánica 87.3%). Se reconoció a la digestión anaerobia como una opción prometedora debido a su habilidad para generar biogás, mientras que el tratamiento químico con cal demostró su efectividad en la erradicación de microorganismos. Se determina que la estabilización es fundamental para el uso seguro de los lodos, sugiriéndose tecnologías ajustadas a las condiciones locales de Bolívar para mejorar su administración y reducir los efectos adversos.

Palabras clave: Compostaje; Digestión Anaerobia; Estabilización de Lodos; Aguas Residuales; Sostenibilidad; Contaminación; Tecnología Ambiental.

Abstract

The present study aims to evaluate the characteristics of the residual sludge generated from the treatment of effluents, with special attention to case studies such as the oxidation lagoons of the Bolívar canton, Manabí province, Ecuador. A systematic analysis of the scientific literature published between 2000 and 2025 was carried out, using databases such as Google Scholar, ScienceDirect, Scopus and Springer, with the aim of evaluating stabilization techniques such as composting, anaerobic digestion and chemical treatment. The findings highlight composting as an effective method for sludge stabilization, as long as the carbon-to-nitrogen (C/N) ratio and pH are maintained. This facilitates the reduction of pathogens and the production of valuable by-products such as fertilizers. The physicochemical analysis of the sludge from Ecuador revealed a neutral pH (7.2), high electrical conductivity (1.51 S/cm) and a fluctuating organic matter content (3.8%), which distinguishes it from sludge from nations such as Colombia (pH 12.7) or Germany (organic matter 87.3%). Anaerobic digestion was recognized as a promising option due to its ability to generate biogas, while chemical treatment with lime proved effective in eradicating microorganisms. It is determined that stabilization is fundamental for the safe use of sludge, suggesting technologies adjusted to the local conditions of Bolivar to improve its management and reduce adverse effects.

Keywords: Composting; Anaerobic Digestion; Sludge Stabilization; Wastewater; Sustainability; Pollution; Environmental Technology.

Resumo

O presente estudo tem como objetivo avaliar as características do lodo residual gerado no tratamento de efluentes, com atenção especial a estudos de caso como as lagoas de oxidação do cantão Bolívar, província de Manabí, Equador. Foi realizada uma análise sistemática da literatura científica publicada entre 2000 e 2025, usando bancos de dados como Google Scholar, ScienceDirect, Scopus e Springer, com o objetivo de avaliar técnicas de estabilização como compostagem, digestão anaeróbica e tratamento químico. Os resultados destacam a compostagem como um método eficaz de estabilização de lodo, desde que a relação carbono/nitrogênio (C/N) e o pH sejam mantidos. Isso facilita a redução de agentes patogênicos e a produção de subprodutos valiosos, como fertilizantes. A análise físico-química do lodo do Equador revelou um pH neutro (7,2), uma alta condutividade elétrica (1,51 S/cm) e um conteúdo flutuante de matéria orgânica (3,8%), o que o distingue do lodo de países como a Colômbia (pH 12,7) ou a Alemanha (matéria orgânica 87,3%). A digestão anaeróbica foi reconhecida como uma opção promissora devido à sua capacidade de gerar biogás, enquanto o tratamento químico com cal mostrou-se eficaz na erradicação de microrganismos. A estabilização é identificada como fundamental para o uso seguro do lodo, sugerindo tecnologias adaptadas às condições locais em Bolívar para melhorar o gerenciamento do lodo e reduzir os efeitos adversos.

Palavras-chave: Compostagem; Digestão Anaeróbica; Estabilização de Lodo; Águas Residuais; Sustentabilidade; Poluição; Tecnologia Ambiental.

1. Introducción

El tratamiento de aguas residuales genera lodos residuales, los cuales pueden convertirse en biosólidos, de uso como fertilizante o compost. Sin embargo, la gestión de lodos residuales presenta desafíos importantes. En Europa solo la mitad de los lodos residuales se destinan a la agricultura o silvicultura, mientras que menos del 25% se recicla o compost de manera efectiva (Quiñones, 2020). Esta situación es preocupante, ya que la gestión inadecuada de lodos residuales puede contaminar el suelo con metales pesados, patógenos humanos y contaminantes orgánicos, incluyendo nuevos contaminantes emergentes como micro plásticos y productos farmacéuticos (Domínguez *et al.*, 2021). Los contaminantes presentes en los lodos residuales pueden afectar la salud del suelo, la calidad de los cultivos y la seguridad alimentaria.

En América Latina y el Caribe, la problemática se agrava por la falta de infraestructura adecuada para el tratamiento de lodos residuales. Un estudio de la Organización Panamericana de la Salud (OPS) reveló que aproximadamente el 70% de las lagunas de oxidación, que son sistemas comunes para el tratamiento de aguas residuales en la región, no cumplen con los estándares de calidad del agua (Flebes & Hoogesteijn, 2010; García, 2015). Esto puede resultar en la contaminación de fuentes de agua dulce y la propagación de enfermedades.

El manejo inadecuado de desechos sólidos y líquidos representa un grave problema ambiental y de salud pública a nivel global (Hlgua, 2024). En México, la gestión sostenible de residuos ha enfrentado desafíos significativos, como lo demuestra la producción diaria de 1,020 kg per cápita de residuos sólidos urbanos (RSU) en 2010 (Gran Castro & Bernache, 2016). A nivel mundial, se proyecta que la cantidad de residuos generados se duplique para 2050, alcanzando los 3,400 millones de toneladas anuales (Alam *et al.*, 2024; Kaza, Yao, Bhada & Van Woerden, 2018).

El lodo residual, generado durante el tratamiento de aguas residuales domésticas, representa un desafío importante para la gestión ambiental y la salud pública (Restrepo, 2023). Su inadecuada disposición puede contaminar el suelo y el agua con metales pesados como zinc, cobre, níquel, cadmio, plomo, mercurio y cromo, así como con microorganismos patógenos y compuestos orgánicos persistentes (Baca, 2020). Para abordar esta problemática, se han desarrollado diversas estrategias de estabilización y disposición final, incluyendo el tratamiento químico, la incineración, la deshidratación, el compostaje y el vermicompostaje (Sánchez, 2022). El tratamiento químico, por ejemplo, mediante el uso de cal viva o hidratada, ha demostrado ser efectivo en la reducción de la carga de microorganismos patógenos en los lodos (Meza, 2019).

El compostaje se presenta como una alternativa sostenible para el tratamiento de lodos residuales, transformándolos en abono orgánico para la regeneración de suelos degradados (Saldaña & Castillo, 2021). Este proceso no solo estabiliza los lodos, sino que también genera un producto valioso para la agricultura. La estabilización de biosólidos con óxido de cal puede mejorarse mediante la adición de cenizas de aceite de palma, lo que facilita su reutilización como materiales de construcción (Molina,

2022). En el caso de lodos con riesgo potencial, la adición de materiales como paja y aserrín puede ser necesaria para mitigar la toxicidad de los metales pesados, permitiendo su asimilación por lombrices y evitando así su inactividad. En Medellín, Colombia, se han implementado pacas biodigestoras para el tratamiento de lodos residuales, utilizando residuos alimenticios de cafeterías y residuos de poda, junto con lodo biológico proveniente de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) del municipio de Gómez Plata (Ossa *et al.*, 2021). Esta iniciativa demuestra el potencial del compostaje para el tratamiento de lodos residuales a nivel local.

La estabilización biológica, en particular la digestión anaerobia, ofrece una solución prometedora para el tratamiento de aguas residuales y la gestión de biosólidos. Este proceso biológico, que se lleva a cabo en ausencia de oxígeno, utiliza microorganismos para descomponer la materia orgánica compleja presente en las aguas residuales y los biosólidos, transformándola en compuestos más simples y estables (Rojas, 2020; Fioravanti *et al.*, 2005; Díaz *et al.*, 2015). La digestión anaerobia produce biogás, una fuente de energía renovable compuesta principalmente por metano y dióxido de carbono. El biogás puede ser utilizado como combustible para la generación de electricidad o calor, contribuyendo a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (Arévalo & Lituma, 2010).

Dada la problemática del manejo adecuado de lodos residuales domésticos provenientes de PTARs, el presente estudio tiene como objetivo evaluar las características de los lodos residuales generados del tratamiento de efluentes, con especial atención a casos de estudio como el de las lagunas de oxidación del cantón Bolívar, provincia de Manabí, Ecuador. La presente caracterización de lodos residuales se la realizará mediante una revisión bibliográfica de estudios llevados a cabo en otras regiones del país y a nivel internacional. Los aportes de la presente revisión bibliográfica en enfocan en (i) establecer los principios y fundamentos de la estabilización; (ii) presentar información de diferentes fuentes sobre la caracterización de lodos residuales; (iii) determinar el impacto de la aplicación directa de lodos residuales en el suelo, y (iv) evaluar las diferentes técnicas para la estabilización físico-química y biológica de lodos residuales.

2. Metodología

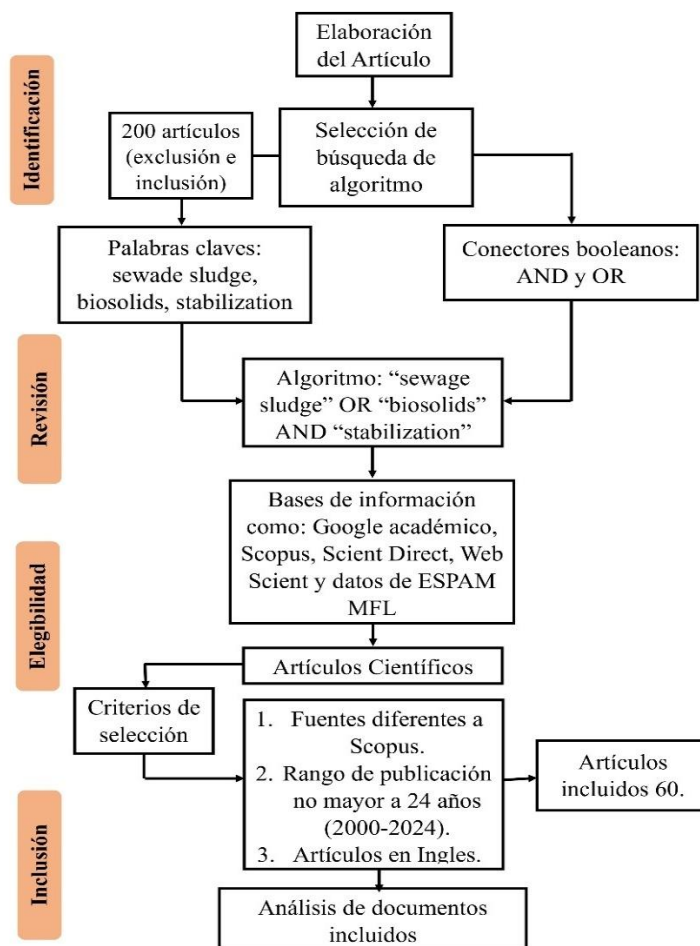
La presente revisión sistemática profundiza en el estudio de un enfoque cuantitativo (Pereira *et al.*, 2018) no experimental los diversos tratamientos de estabilización de lodos residuales generados en lagunas de oxidación, un componente primordial en el manejo de aguas residuales. El objetivo principal es proporcionar una base bibliográfica sólida y actualizada que permita optimizar la estabilización de estos residuos a gran escala, abordando los desafíos inherentes a su tratamiento y manejo.

La recopilación de datos se llevó a cabo a través de una exhaustiva búsqueda de palabras claves en inglés y español en bases de datos científicas de renombres, incluyendo Google Académico, ScienceDirect, Scopus y Springer. Se utilizaron combinaciones de operadores booleanos, "wastewater" AND "sewage sludge" OR "biosolids" (AND "composting" OR "digestion" OR "stabilization") para identificar artículos relevantes publicados entre el año 2000 hasta 2025, como lo indica la Figura 1.

En la Figura 1 se describe los respectivos pasos de la investigación mediante la metodología sistemática PRISMA: Fase 1, identificación exhaustiva de búsqueda sistemática en bases de datos ya mencionadas con las palabras claves y operadores booleanos, en donde 200 artículos fueron relevantes; Fase 2, cribado en comprobación del juicio de inclusión (artículos experimentales 2000- 2025 con información cualitativa/cuantitativa) aproximadamente 60 artículos y exclusión con un total de 140 estudios de prioridad baja. Fase 3, elegibilidad descartando los no relevantes e incorporando los análisis fundamentales como clasificación final. La excelencia de las investigaciones se valoró en función del rigor metodológico, la pertinencia y la capacidad replicabilidad. Con el objetivo de garantizar la calidad de la información; Fase 4, la revisión se centró en artículos

científicos de acceso abierto, con datos completos o que cumplieran con los estándares metodológicos exigidos, de los cuales entre **50 y 60 artículos** fueron seleccionados con las bases de datos antes mencionada (Page *et al.*, 2021).

Figura 1 - Metodología sistemática PRISMA.



Fuente: Autores.

3. Resultados y Discusión

3.1 Principios y fundamentos de la estabilización

La *estabilización* se define como aquellos procesos físico-químicos y biológicos capaces de reducir la carga orgánica, patógenos, malos olores, con el fin de disponer de lodos residuales para su manejo adecuado, sustentable y con bajo impacto ambiental (Afrin, 2017). El *compostaje* es uno de los procesos más conocidos a la hora de estabilizar grandes cantidades de lodos; es decir que la estabilidad del compost y su madurez dependerá radicalmente de la materia prima (Górka *et al.*, 2022; Stegenta *et al.*, 2022).

El pH desempeña un papel crucial en la estabilización de procesos al determinar el nivel de acidez o alcalinidad de un sistema. Este factor influye directamente en las reacciones químicas, la actividad enzimática y la población microbiana. Un control inadecuado del pH puede provocar alteraciones, inhibir procesos esenciales o impedir la estabilización de compuestos, afectando la eficiencia del sistema. Por su parte, la temperatura regula la velocidad de las reacciones químicas y la actividad microbiana, siendo un factor clave para lograr una estabilización eficiente. Un aumento moderado de la temperatura suele acelerar los procesos; sin embargo, temperaturas extremas pueden tener efectos adversos. Por ejemplo, en el compostaje, un

rango de 55-65 °C es óptimo para eliminar patógenos y acelerar la descomposición de la materia orgánica. No obstante, temperaturas superiores a 70 °C pueden eliminar microorganismos beneficiosos, comprometiendo la calidad del proceso (Barragán *et al.*, 2002; Cárdenas *et al.*, 2022).

La adición de compuestos químicos se utiliza para alterar las condiciones del medio, como el pH, la presencia de nutrientes o la prevención de reacciones no deseadas. Tienen la capacidad de funcionar directamente como estabilizadores o simplificar procesos químicos y biológicos. En tratamiento de lodos, incrementa el pH, elimina metales pesados y disminuye los olores, estabilizando el material como el hidróxido de calcio. Mientras que, en tratamientos biológicos se incorporan nutrientes sustentando la actividad de los microorganismos cuando el sustrato no es adecuado, la dosificación debe ser exacta para prevenir efectos negativos, como la toxicidad o la generación de subproductos; la aplicación de bacterias individuales optimiza la estabilización al descomponer compuestos complejos o convertir contaminantes en formas menos adversas. A lo largo de la digestión anaerobia, la adición de cepas microbianas potencia la generación de biogás y la consolidación de los lodos (Ángeles de Paz, 2023; Holguino y Román, 2021). Los co-sustratos son componentes adicionales que fortalecen la estabilización proporcionando carbono, energía o nutrientes, siendo muy usual en procesos de co-digestión anaerobia. En el mecanismo de digestión anaerobia, los co-sustratos suelen ser ricos en carbono por la adición de residuos alimentarios (Berrío, 2022; Rosa, 2017).

Las PTARs están siendo reconocidas cada vez más como elementos fundamentales dentro de la economía circular, ya que ofrecen la posibilidad de recuperar recursos valiosos a partir de los lodos generados, como nutrientes esenciales e incluso compuestos más novedosos, como los polihidroxialcanoatos. Además, se ha comprobado que incorporar materiales inorgánicos durante el proceso de compostaje de estos lodos no solo mejora la calidad del compost resultante, sino que también incrementa la disponibilidad de los nutrientes para las plantas (Capodaglio & Callegari, 2023; Cecconet & Capodaglio, 2022; Dede *et al.*, 2023). Un fundamento indispensable es la aplicación del marco regulatorio evitando riesgos potenciales hacia el ambiente y la salud pública, limitando las concentraciones de metales pesados, cantidades de microorganismos y tipo de madurez de la estabilización de lodos.

En Ecuador, la gestión de biosólidos se rige por normativas como la EPA (Normativa de Clasificación de Biosólidos) y el Reglamento al Código Orgánico del Ambiente (RCOA). Los biosólidos de Clase B, provenientes de lodos tratados en plantas de tratamiento de aguas residuales, tienen una carga reducida de patógenos, pero aún pueden contener algunos, lo que requiere precauciones específicas para su uso. Con un manejo adecuado, estos biosólidos pueden aplicarse de manera segura en actividades como agricultura, reforestación, recuperación de suelos y producción de abono (Garcés, 2019; US EPA, 2019). La Organización Mundial de la Salud (OMS) y la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) establecen directrices de seguridad para prevenir la contaminación del suelo derivada del uso de biosólidos en la agricultura. Estas medidas son esenciales para garantizar un manejo responsable y minimizar riesgos ambientales y de salud pública (Mininni *et al.*, 2015).

A continuación, en las siguientes secciones, se detallarán los parámetros físico-químicos que regulan los procesos de estabilización.

3.2 pH

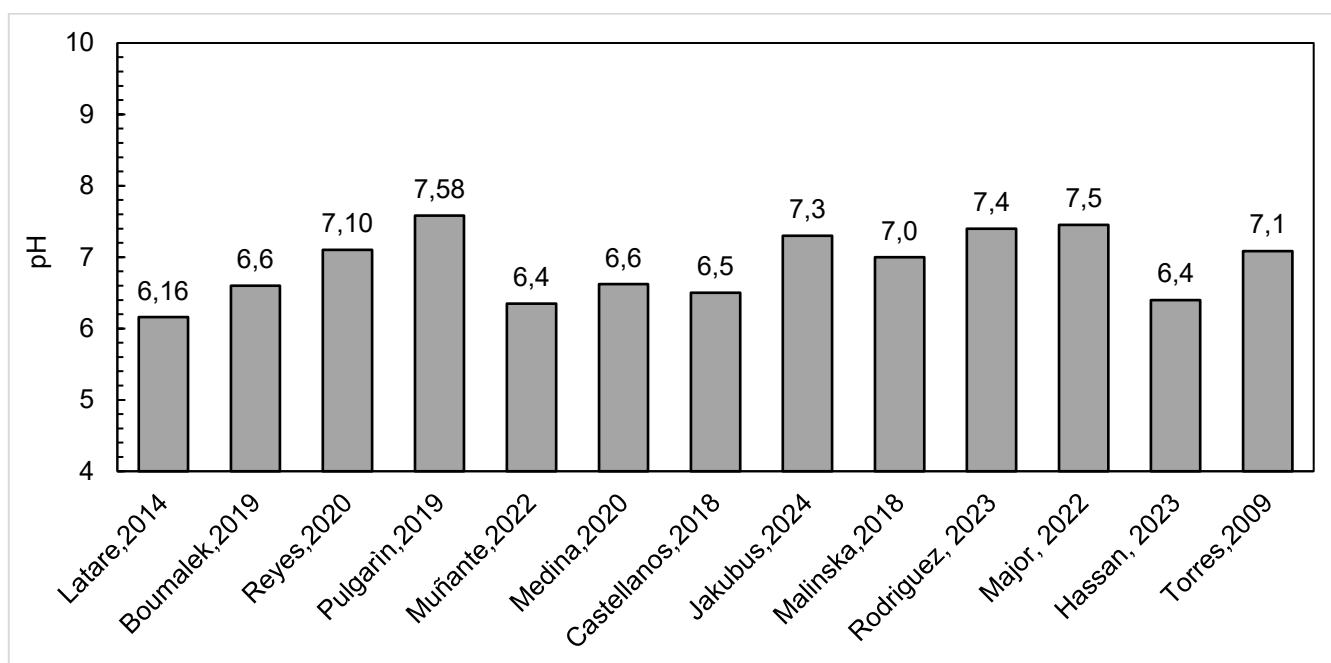
El pH constituye un parámetro decisivo en el tratamiento de lodos, dado que influye directamente en la actividad microbiana. La mayoría de los microorganismos implicados en la digestión de lodos exhiben un rendimiento óptimo dentro de un rango específico de pH. Asimismo, el pH afecta la solubilidad de los metales pesados presentes en los lodos; un nivel inadecuado puede incrementar la movilización de estos metales, elevando el riesgo de contaminación ambiental. Un pH bajo puede inducir la liberación de gas sulfhídrico, lo que genera olores desagradables (Pachaiappan *et al.*, 2022; Pasciucco *et al.*,

2024; Wu *et al.*, 2022).

Un pH ácido genera un cambio en las reacciones químicas de estabilización para la producción de ácidos orgánicos, los cuales generan malos olores, y pérdida de la capacidad de degradar la materia orgánica. Un pH alcalino > 10 genera un efecto desinfectante, lo cual provoca la muerte microbiana y por ende se interrumpe el proceso de estabilización biológica. En ciertos casos, es preferible pH alcalinos para muerte de patógenos y finalizar el proceso de estabilización (Chimbolema, 2025; González y José, 2020)

En la Figura 2, se presentan resultados de pH de lodos residuales sin estabilizar a partir de una revisión bibliográfica. En este sentido, el valor de pH más alto reportado fue de 7.58 en Colombia (2019), seguido de un estudio en Alemania con 7.5 (2022). Por otro lado, el valor más bajo registrado fue de 6.16 en la India (2014). El promedio general de los valores de pH no estabilizados fue de 6,89. Además, se observó que el 46% de los estudios presentaron un pH inferior a 7 (ácidos), mientras que el 64% restante indicaron un pH alcalino.

Figura 2 - Valores de pH en la recolección de datos de diferentes fuentes y autores.



Fuente: Autores.

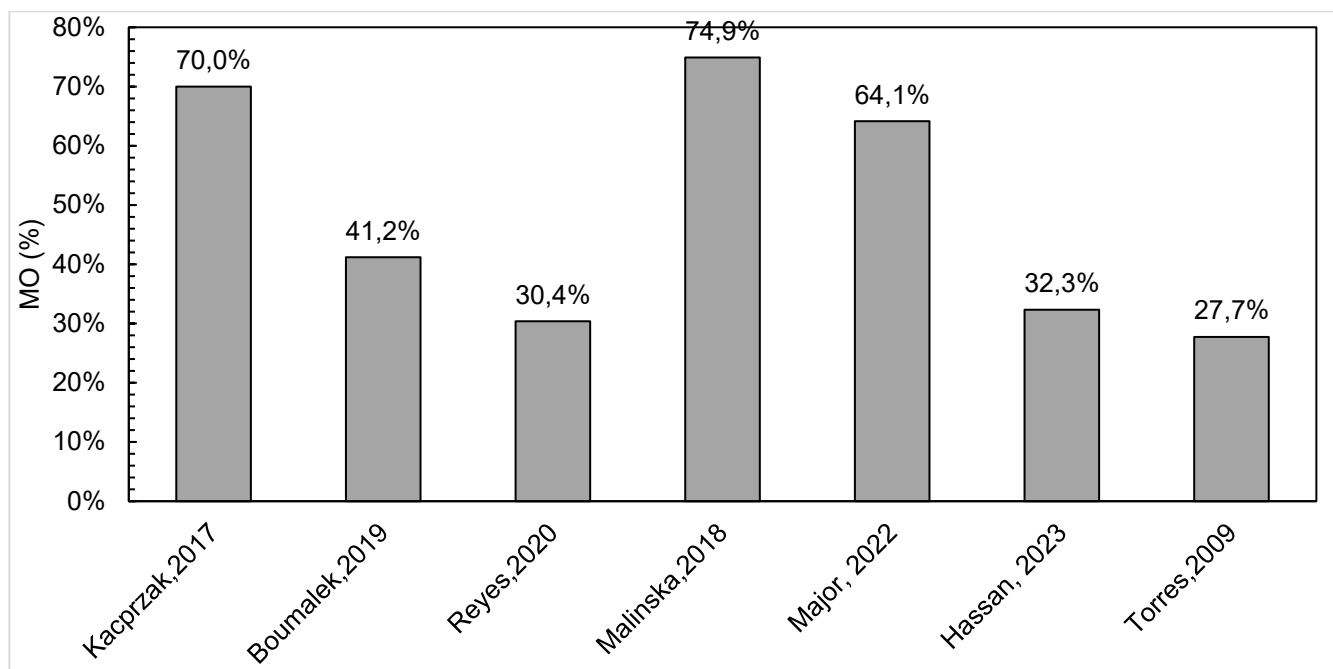
3.3 Materia Orgánica

La materia orgánica en los lodos se mide a través de indicadores como los Sólidos Volátiles (SV), la Demanda Química de Oxígeno (DQO) o la Demanda Biológica de Oxígeno (DBO). Un alto contenido de materia orgánica (MO) representa un mayor potencial energético, lo que la hace ideal para la producción de biogás en digestores anaerobios, contribuyendo a la generación de energía renovable. Sin embargo, la estabilidad de los lodos depende directamente de este contenido; la materia orgánica no estabilizada puede degradarse, generando malos olores y liberando contaminantes que afectan la calidad del medio ambiente (Tamar & Umer, 2022; Wiśniewska & Szyłak, 2021).

Por otro lado, en procesos de tratamiento aerobio, la cantidad de materia orgánica determina los requerimientos de oxígeno necesarios para su biodegradación, lo que influye en la eficiencia del proceso. En el caso del compostaje, un contenido adecuado de materia orgánica es esencial para promover el desarrollo biológico y garantizar la calidad del producto final, que puede utilizarse como enmienda orgánica para mejorar suelos (Bernat *et al.*, 2021; Li *et al.*, 2021).

Según la Figura 3, un 42% de estudios reportan valores de materia orgánica por debajo del 35% mientras que un 58% de estudios reportan valores de materia orgánica por encima del 40% y el promedio general fue de 49%. De hecho, se destaca un estudio en el cual se observa un valor de **74.9%** de materia orgánica. Este estudio fue realizado en Alemania en el año 2018, en una planta procesadora de lodos residuales municipal con el objetivo de presenciar la abundancia de genes de resistencia a antibióticos (GRA) y elementos móviles genéticos (MGE) al momento de realizar el proceso de estabilización. Por otro lado, el más bajo fue realizado en el año 2009 en Colombia y obtuvo un valor de 27.7% de materia orgánica.

Figura 3 - Resultados sobre materia orgánica en lodos residuales de bases de datos investigados.



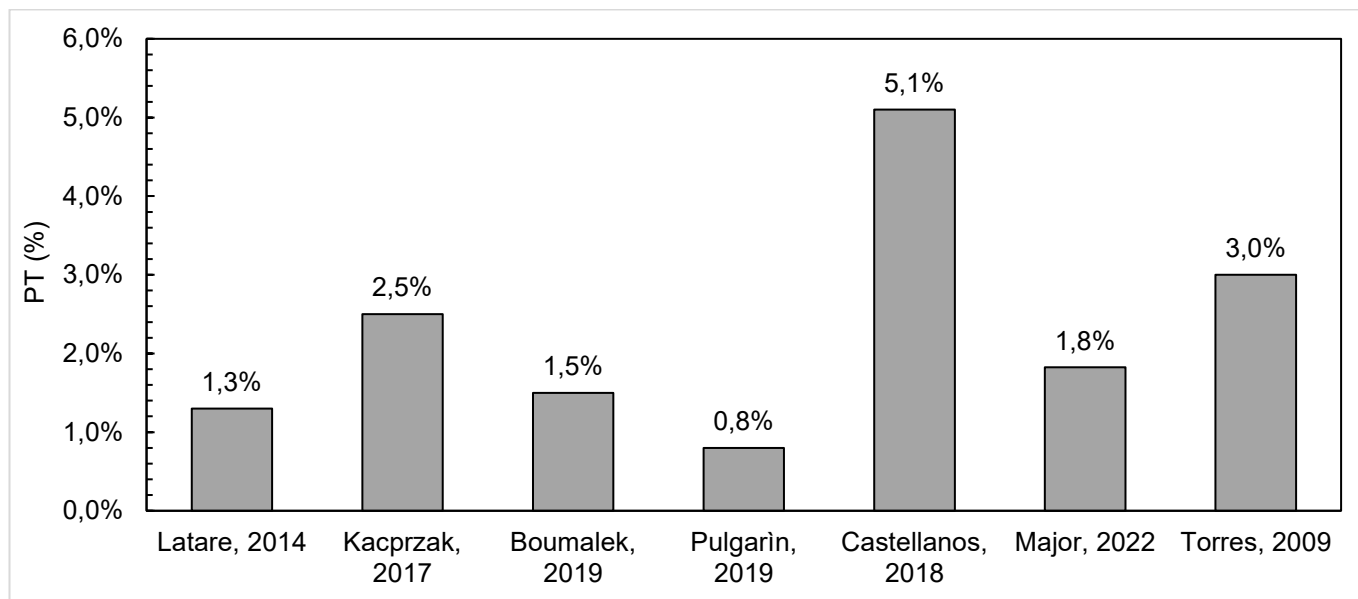
Fuente: Autores.

3.4 Fósforo Total (PT)

El fósforo total es un nutriente clave para el crecimiento microbiano en el ámbito de tratamiento de lodos, ya que facilita la degradación de la materia orgánica mediante el metabolismo de los microorganismos. Igualmente, la recuperación de nutrientes se lleva a cabo mediante el proceso de estruvita, para su reutilización como fertilizante. No obstante, si no se gestiona apropiadamente, su exceso puede desencadenar eutrofización en cuerpos de agua, generando un impacto ambiental altamente significativo (Di Capua *et al.*, 2022; He *et al.*, 2021).

De acuerdo con la Figura 4, un 71% de estudios reportan valores de fósforo total por debajo del 3% mientras tanto un 29% de fósforo total se reportan con valores de 3% en adelante y el promedio general de todos los estudios es de 2.3%. El único valor alto que se recopiló fue un estudio realizado en Colombia en el año 2018 con el 5.1%, representando la deshidratación de lodos mediante la técnica de lecho de secado.

Figura 4 - Resultados del Fósforos totales de diferentes investigaciones.



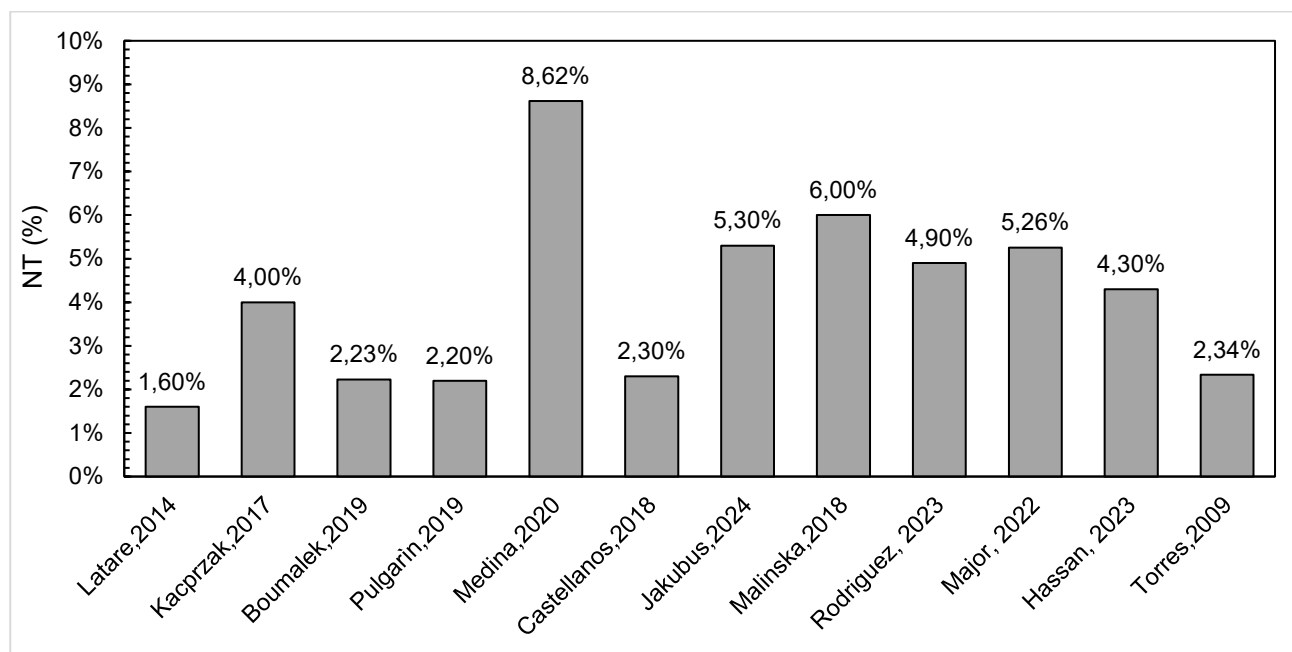
Fuente: Autores.

3.5 Nitrógeno Total (NT)

El nitrógeno total en los lodos, que incluye formas orgánicas, amoniacal, nitritos y nitratos, es un nutriente esencial con importantes implicaciones ambientales y operacionales (Han & Zhou, 2022). Este elemento desempeña un papel crucial en la síntesis celular microbiana, siendo indispensable en las etapas biológicas del tratamiento de lodos, como los procesos aerobios y anaerobios. Un manejo inadecuado del nitrógeno puede generar serios problemas. En condiciones anaerobias, la transformación del nitrógeno orgánico puede producir amoníaco (NH_3), un contaminante atmosférico que afecta la calidad del aire. En procesos aerobios, la remoción del nitrógeno se logra mediante nitrificación y desnitrificación, pero un tratamiento deficiente de lodos ricos en nitrógeno puede provocar la lixiviación de nitratos, lo que representa un riesgo de contaminación de aguas subterráneas (Zhai *et al.*, 2023; Zhao *et al.*, 2024). Por tanto, un control riguroso es esencial para maximizar los beneficios del nitrógeno y minimizar sus impactos ambientales negativos.

El 66% de los estudios realizados de nitrógeno total indica que los valores están por debajo del 5%. Y como concentración promedio en referencia a los estudios reportados, se determinó un valor de 4.09% (Figura 5). No obstante, en 2020, se reportó un valor de nitrógeno total de 8.62%

Figura 5 - Resultados de nitrógeno total de diferentes artículos.



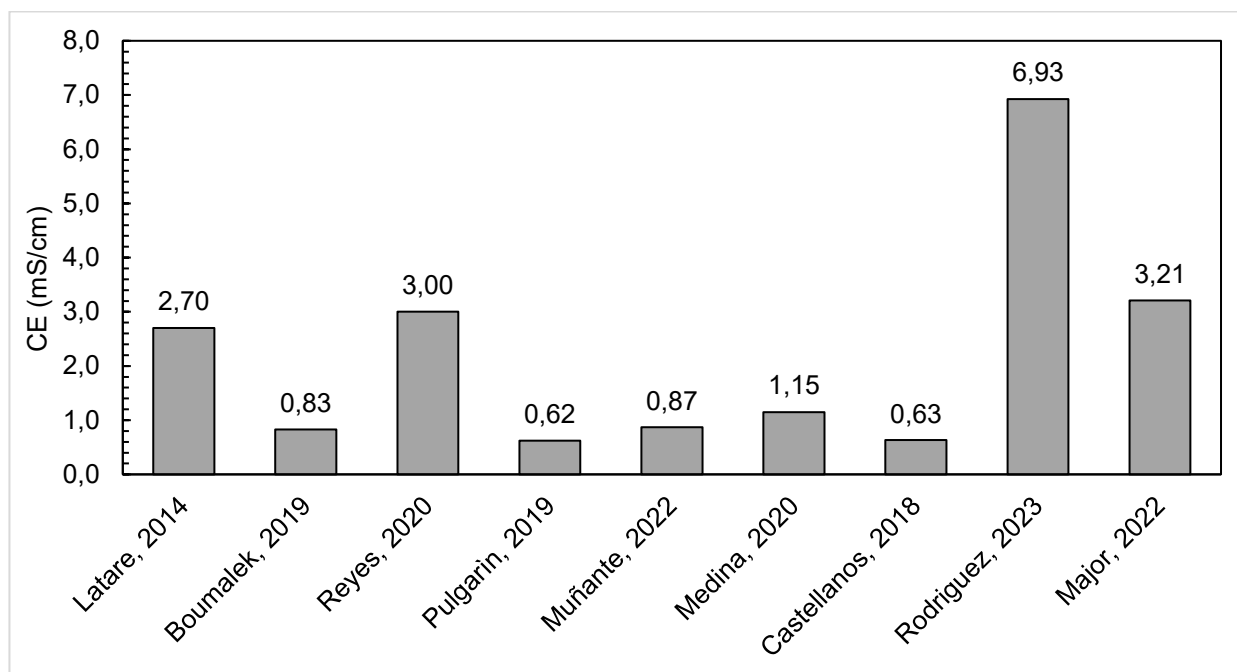
Fuente: Autores.

3.6 Conductividad Eléctrica (CE)

La CE de los lodos es un parámetro crítico que indica la concentración de iones disueltos, principalmente sales, y tiene un impacto directo en su manejo y disposición final. En aplicaciones agrícolas, una alta conductividad puede aumentar la salinidad del suelo, lo que compromete su fertilidad y afecta la salud de los cultivos al limitar su crecimiento y productividad. Asimismo, elevadas concentraciones de sales pueden inhibir la actividad microbiana en procesos de digestión, reduciendo la eficiencia de la degradación biológica de la materia orgánica y afectando la calidad del tratamiento. Además, los iones disueltos incrementan el riesgo de corrosión en tuberías y equipos de las plantas de tratamiento, lo que reduce su vida útil y aumenta los costos de mantenimiento. El monitoreo continuo de la CE permite detectar variaciones en la calidad de las aguas residuales o anomalías en los procesos de tratamiento, facilitando la aplicación de medidas correctivas. Este control es esencial para optimizar la gestión de lodos, minimizar impactos ambientales adversos y garantizar la sostenibilidad de los procesos de tratamiento (Cortés, 2013; Nieves & González, 2023; Rodríguez *et al.*, 2010).

Según la revisión bibliográfica (Figura 6), el promedio de CE es de aproximadamente 2.22 mS/cm. El valor mínimo de CE obtenido fue de 0.62 mS/cm (Pulgarín, 2019), mientras que el valor máximo fue de 6.93 mS/cm (Rodríguez, 2023). Estos resultados reflejan una amplia variabilidad en la concentración de sales en lodos residuales, destacando casos como Rodríguez (2023) con un valor significativamente alto, lo que podría indicar condiciones específicas de los lodos analizados.

Figura 6 - Resultados de CE de distintas referencias bibliográficas.



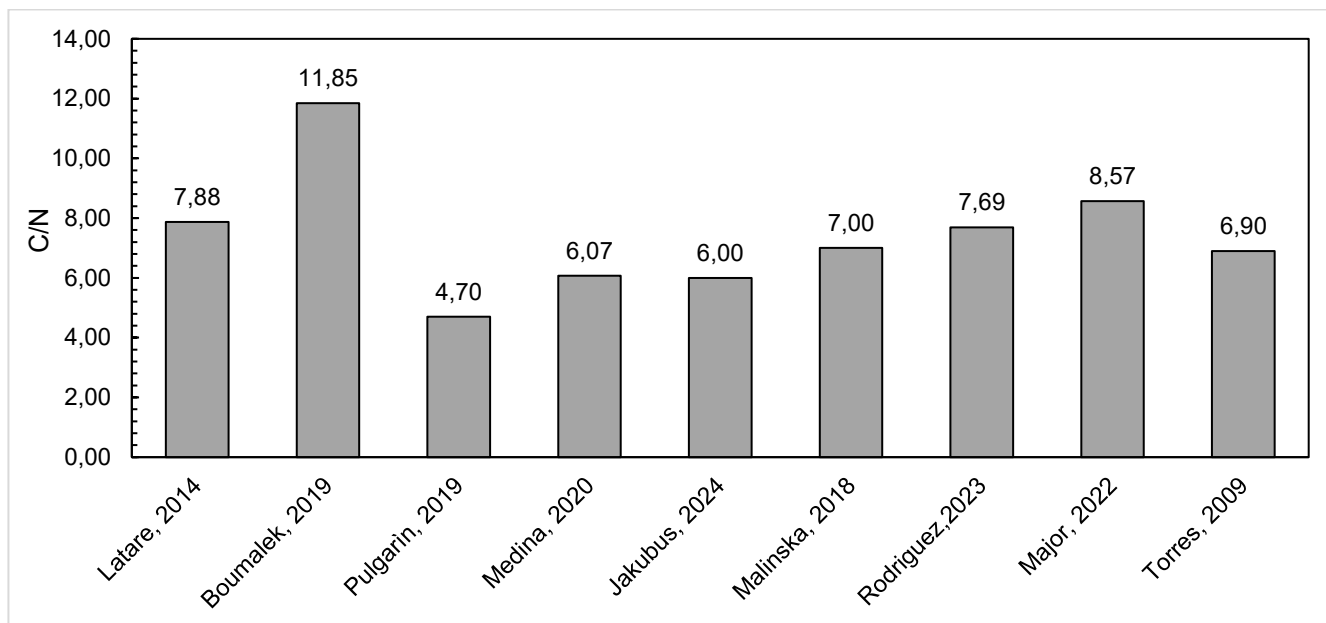
Fuente: Autores.

3.7 Relación Carbono/Nitrógeno (C/N)

La relación C/N es un parámetro clave en procesos biológicos como la digestión anaerobia y el compostaje, ya que representa la proporción entre el carbono orgánico, principal fuente de energía, y el nitrógeno, esencial para la síntesis de componentes celulares microbianos. Un equilibrio adecuado en esta relación (generalmente entre 20:1 y 35:1 según el proceso) garantiza un crecimiento microbiano óptimo, maximizando la eficiencia de la degradación orgánica y la producción de subproductos valiosos. En la digestión anaerobia, una C/N entre 20:1 y 30:1 promueve una producción estable de biogás, optimizando el rendimiento energético. Sin embargo, un exceso de nitrógeno puede generar acumulación de amoníaco, inhibiendo la actividad microbiana, mientras que un déficit de carbono limita el metabolismo microbial, reduciendo la eficacia del proceso (Choi *et al.*, 2020; Dume *et al.*, 2023). En el compostaje, una C/N óptima de 25:1 a 35:1 asegura una descomposición eficiente, evitando olores desagradables, lentitud en el proceso o temperaturas no deseadas, lo que mejora la calidad del producto final. Además, la relación C/N influye directamente en la idoneidad de los lodos para aplicaciones agrícolas, determinando la disponibilidad de nutrientes y la fertilidad del suelo. Un manejo preciso de este parámetro no solo perfecciona los procesos de tratamiento, sino que también minimiza impactos ambientales negativos, como emisiones contaminantes o degradación del ecosistema (Lian *et al.*, 2025; Zheng *et al.*, 2022). Por ello, su monitoreo y ajuste son fundamentales para la sostenibilidad de estos sistemas.

Según los resultados reportados en la Figura 7 sobre lodos residuales sin tratamiento, estudios de Boumalek (2019) reportaron valores máximos de C/N de 11.85. Por otro lado, el 89% de estudios demuestran valores de C/N por debajo de 10 y con un promedio general de 7.41. Un estudio realizado en Colombia se registró el valor más bajo de C/N de 4.70.

Figura 7 - Investigaciones de Relación de C/N según acorde a sus autores.



Fuente: Autores.

3.8 Caracterización de lodos residuales

La caracterización de los lodos residuales es esencial para una gestión eficaz en plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR), ya que los lodos no tratados representan un riesgo significativo para la salud y el medio ambiente al contener metales pesados, microorganismos patógenos e insectos vectores de enfermedades (Castellanos *et al.*, 2018). A pesar de ello, estos lodos poseen un alto potencial de reutilización gracias a su contenido de nutrientes y materia orgánica, siendo valiosos para la agricultura y la recuperación de suelos. Sin embargo, su aprovechamiento requiere un proceso de estabilización que elimine patógenos, reduzca olores y mitigue riesgos sanitarios y ambientales, utilizando métodos eficientes que garanticen un uso seguro como insumo agrícola o una disposición final sostenible (Castillo *et al.*, 2020).

La Tabla 1 presenta un análisis comparativo de investigaciones (2000-2023) sobre caracterización de lodos en diferentes países, destacando su impacto en la estabilización. En América, Colombia y EE. UU. muestran un pH variable (12.7, el más alto, y 6.3, neutro), mientras que Ecuador, con un pH de 7.2, es apto para usos agrícolas, aunque su alta conductividad eléctrica (1.51 uS/cm) y contenido de sales disueltas superan al de EE. UU. (0.008 uS/cm), lo que puede afectar la fertilidad. Ecuador (3.8%) y Colombia (23.77%) destacan por su elevada materia orgánica frente a EE. UU. (1.9%), y Ecuador muestra un mayor nitrógeno total (48.51%) que EE. UU. (0.10%), mejorando su potencial como fertilizante. Las relaciones C/N de Colombia (13:1) y EE. UU. (12:1) son adecuadas para estabilización (Castillo *et al.*, 2020; Orlina *et al.*, 2024; Torres *et al.*, 2009).

En Europa, España (pH 7.5) y Polonia (pH 7.0) presentan valores neutros, a diferencia de Alemania (pH 5.8, ácido). España lidera en sales solubles (8.12 S/cm) frente a Alemania (1 S/cm), mientras que Polonia (87.3%) y Alemania (74.9%) superan a España en materia orgánica. Sin embargo, Alemania (C/N 22:1) ofrece mayor estabilidad que Polonia (7:1) y España (14:1), influyendo en la calidad del compostaje (Major *et al.*, 2022; Rodríguez *et al.*, 2023; Malińska *et al.*, 2018).

En África y Asia, Argelia (pH 6.6) e India (pH 6.2) muestran condiciones ligeramente ácidas favorables. India, con mayor conductividad (2.7 uS/cm) que Argelia (0.83 uS/cm), tiene menos materia orgánica, pero Argelia destaca en fósforo (1.5%) y nitrógeno (2.23%) frente a India (1.3%, 1.6%), lo que refuerza su idoneidad agrícola gracias a métodos de estabilización efectivos (Boumalek *et al.*, 2019; Latare *et al.*, 2014).

Tabla 1 - Propiedades fisicoquímicas de los lodos residuales de los distintos países.

País	pH	CE (uS/cm)	Materia orgánica (%)	Fosforo (%)	Nitrógeno (%)	C/N	Referencia
India	6.2	2.7	-	1,30	1,60	-	Latare <i>et al.</i> (2014)
Argelia	6.6	0.83	41.20	1.50	2.23	12:1	Boumalek <i>et al.</i> (2019)
Ecuador	7.2	1.51	3.80	-	48.51	.-	Castillo <i>et al.</i> (2020)
Polonia	7.0	-	74.90	-	60	7:1	Malinska <i>et al.</i> (2018)
España	7.5	8.12	-	-	33.40	14:1	Rodríguez <i>et al.</i> (2023)
Alemania	5.8	1.0	87.30	33	2.60	22:1	Major <i>et al.</i> (2022)
Usa	6.3	0.008	1.90	-	0.10	12:1	Orlina <i>et al.</i> (2024)
Colombia	12.7	-	23.77	1.63	1.04	13:1	Torres <i>et al.</i> (2009)
Rusia	-	-	70	2.50	4.0		Kacprzak <i>et al.</i> (2017)

Fuente: Autores.

3.9 Aplicación directa de lodos en el suelo

La aplicación de lodos residuales en suelos agrícolas, aunque inicialmente diseñada para enriquecer la tierra y aumentar la productividad de los cultivos mediante el aporte de nutrientes como el nitrógeno, plantea riesgos significativos que desaconsejan su uso. Si bien estudios indican que estos lodos pueden estimular la actividad microbiana a corto plazo, mejorando temporalmente la fertilidad del suelo (Luisa *et al.*, 2000; Medina *et al.*, 2020), su incorporación conlleva consecuencias. La movilización de compuestos nitrogenados puede contaminar aguas subterráneas con nitratos y otros inorgánicos, afectando la calidad del agua y la salud pública. Además, los efectos a largo plazo, que dependen de las propiedades del suelo, incluyen acumulación de contaminantes, lo que compromete la sostenibilidad y la seguridad agrícola.

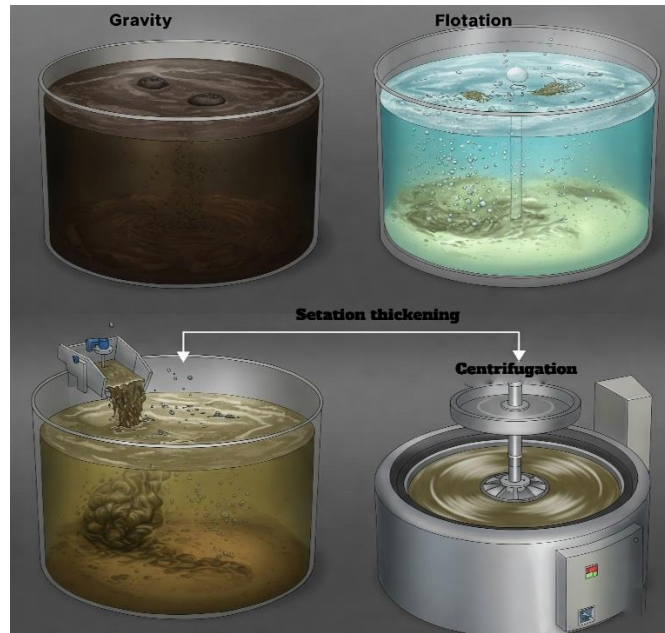
Esta preocupación se ve respaldada por la prohibición de usar lodos de tratamiento de aguas como fertilizantes en países como Alemania y gran parte de la Unión Europea, donde se han detectado niveles excesivos de metales pesados, sustancias tóxicas y contaminantes emergentes que superan los límites permisibles (Precci *et al.*, 2022). Estos hallazgos subrayan el riesgo de bioacumulación en los suelos y cultivos, lo que representa una amenaza directa a la seguridad alimentaria y al equilibrio ecológico, justificando la necesidad de descartar esta práctica en favor de alternativas más seguras.

3.10 Técnicas estabilizadoras de lodos

3.10.1 Alternativas tradicionales

Espesamiento: método de disminución volumétrica y concentración a través de mecanismos físicos vinculados con el espesamiento, la flotación debido a la gravedad y centrifugación. Dicha técnica por flotación conceptualiza en saturar con aire dicha solución llegando entre dos a cuatro atmosferas (presión), produciendo burbujas de aire generando que los sólidos floten para poder sustraerse (Marín 2019; Yupanqui *et al.*, 2024). La técnica por gravedad se usó de manera eficiente en los tratamientos de lodos primarios, en el cual inicia con un reactor o tanque de sedimentación implementando acción rotatoria provocando que dichas partículas se crezcan y endurezcan localizadas en el fondo para removerlas. Por lo consiguiente, el método de centrifugado aplica la terminología, atrapando el lodo en las paredes del reactor, haciendo su recolección mucho más fácil (Gualoto, 2017).

Figura 8 - Espesamiento por gravedad, flotación y centrifugación.

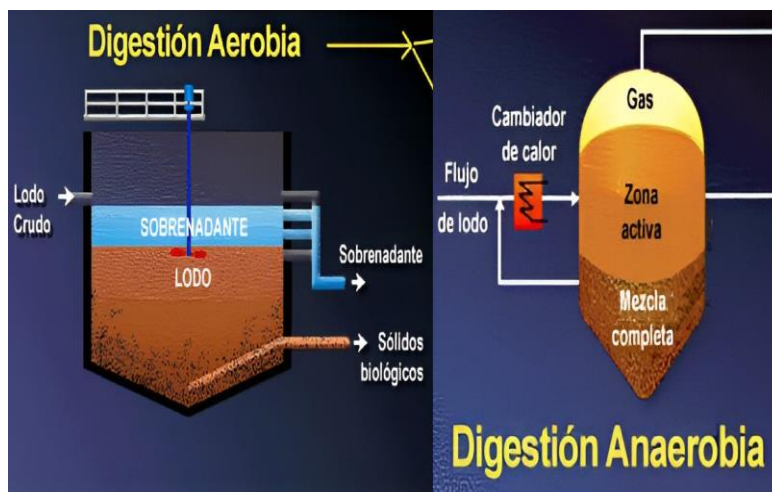


Fuente: Autores.

Digestión anaeróbica: se realiza dentro de un reactor en ausencia de oxígeno, sintetizando la materia orgánica para la formación de gas metano y ácidos volátiles. Es considerado apto para los tratamientos primarios y mixtos, conteniendo más del 50% de sólidos volátiles (Appels *et al.*, 2008; Nguyen *et al.*, 2021; Tulun & Bilgin, 2019; Yu *et al.*, 2014).

Digestión aeróbica: según con Pérez (2016), este procedimiento de estabilización de lodos se logra mediante una aireación continua. Cuando los microorganismos superan su fase de crecimiento activo, ocurre la autooxidación. Cabe mencionar que métodos como la digestión aerobia termófila y mesófila son menos frecuentes en la práctica, principalmente porque exigen periodos de tratamiento bastante largos, que pueden llegar de 10 a 30 días (Mahamud *et al.*, 1996).

Figura 9 - Comparación de la técnica de digestión aerobia y anaeróbica.

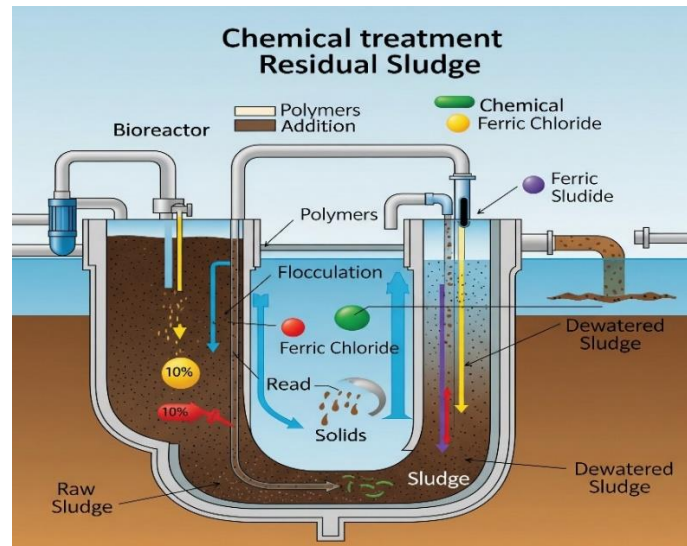


Fuente: Imagen de Digestión

Tratamiento químico: este método es un proceso bactericida que su objetivo es detener temporalmente la fermentación ácida de dichos lodos residuales. Se basa en subir el pH por encima de 12 en el transcurso de al menos dos horas, realizando un

ambiente hostil para los microorganismos. De este modo, se evita la descomposición de la materia, lo que a su vez minimiza los riesgos para la salud pública. Con ese fin, el $\text{Ca}(\text{OH})_2$ es el reactivo más empleado, gracias a su alta alcalinidad y bajo costo (Gualoto, 2017; Marín, 2019).

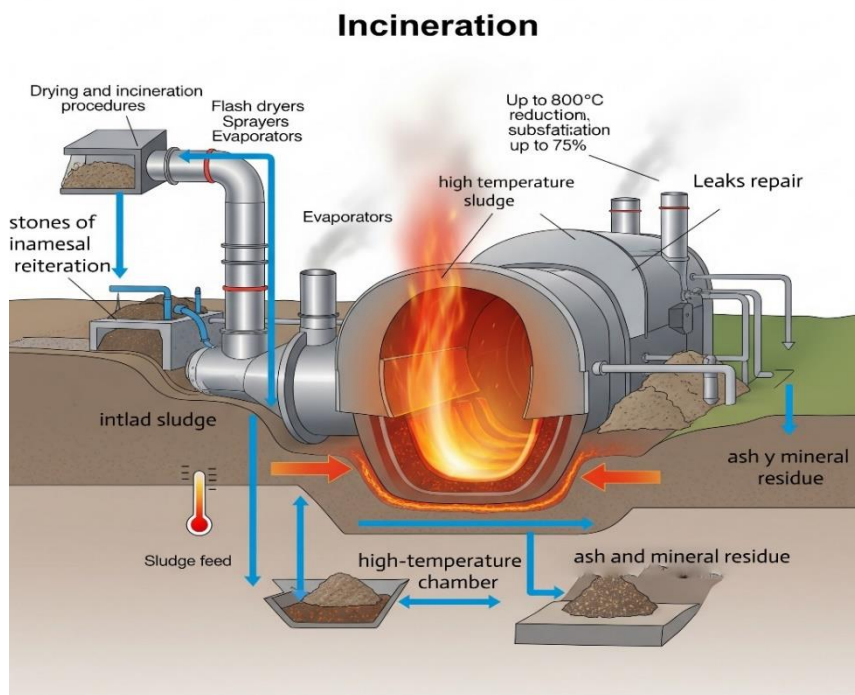
Figura 10 - Tratamiento químico en lodos residuales.



Fuente: Autores.

Incineración: este método conlleva un proceso de combustión que sucede a temperaturas aproximadas a los 800 °C, logrando una gran reducción de alto impacto hacia la masa residual de lodos, dando como resultado que se origina materiales minerales inofensivos. Se logra reducir el volumen de los lodos hasta en un 75% (Oliva *et al.*, 2019; Patel *et al.*, 2020).

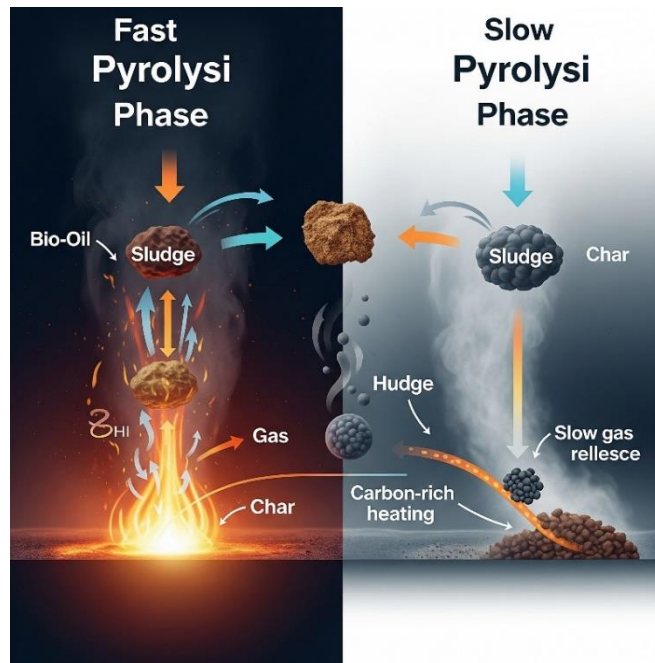
Figura 11 - Técnica de incineración en tratamiento de lodos.



Fuente: Autores.

Pirólisis: método térmico a una temperatura $> 300^{\circ}\text{C}$, la reducción de lodos se lleva a cabo en un ambiente con poca o nula presencia de oxígeno, y este proceso se desarrolla a dos velocidades distintas: una rápida y otra lenta. La fase rápida implica un calentamiento acelerado en un corto período, mientras que la fase lenta se caracteriza por un calentamiento gradual que se extiende por un tiempo más prolongado (Alvarez *et al.*, 2015; Li *et al.*, 2021; Patel *et al.*, 2019).

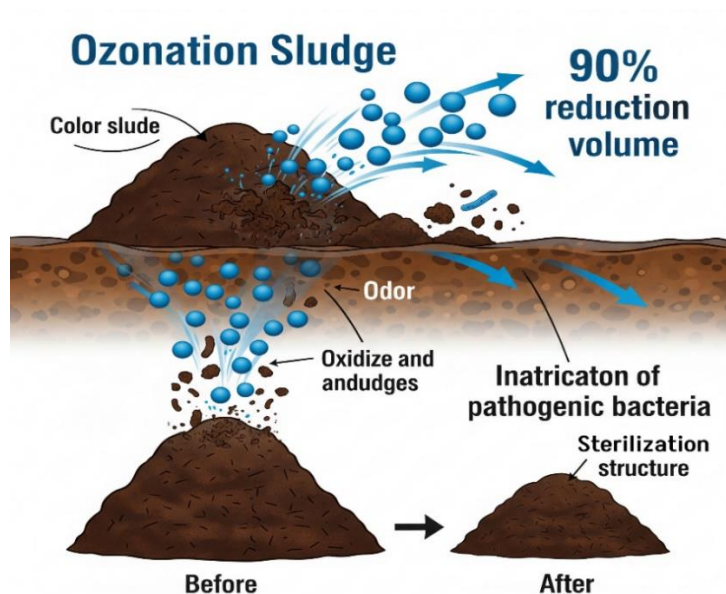
Figura 12 - Técnica de pirólisis en tratamiento de lodos.



Fuente: Autores.

Ozonización: de acuerdo con (Díaz *et al.*, 2015) este procedimiento utiliza ozono como agente oxidante, a su vez el gas es muy eficaz para erradicar por completo el color y el olor de los lodos, logrando reducir su volumen en un 90% en muy poco tiempo y agiliza la inactivación de la actividad bacteriana.

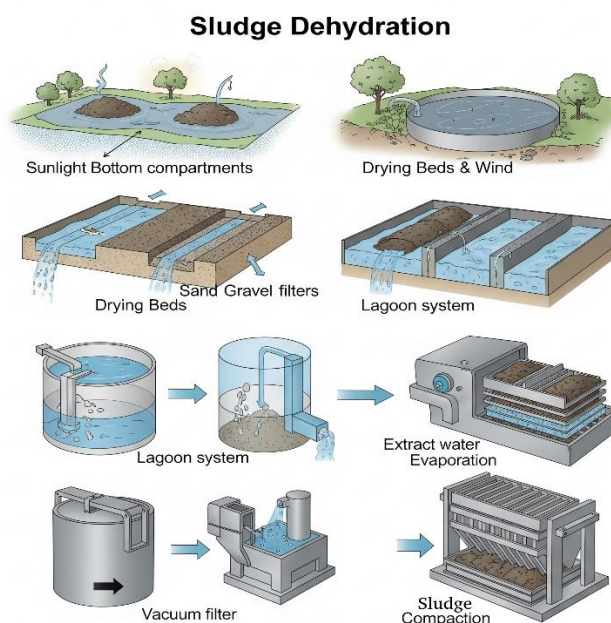
Figura 13 - Técnica de ozonización en tratamiento de lodos.



Fuente: Autores.

Deshidratación: Este proceso natural consiste en colocar los lodos en compartimentos de fondo poroso, de esta manera la acción de la luz solar y el viento permite su deshidratación. Dentro de esta categoría, encontramos métodos estáticos como el lecho de secado, que elimina el agua usando un filtro de arena y grava. Otra técnica empleada es la evaporación, también presente en los sistemas de lagunaje mientras que, a la maquinaria, el filtro al vacío sustrae el agua gracias a los filtros de su tambor rotatorio. Por último, la filtro prensa compacta el lodo aplicando presión con bandejas, logrando una remoción total del agua (Castellanos *et al.*, 2018).

Figura 14 - Técnica de deshidratación en tratamiento de lodos.



Fuente: Autores.

Las opciones tradicionales para el tratamiento de lodos presentan ventajas y desventajas que restringen su uso en las PTAR. Por una parte, el espesamiento y la deshidratación reducen los costos de operación no obstante las técnicas como el espesamiento por flotación y la centrifugación aumentan los gastos de mantenimiento, asimismo algunas de estas alternativas requieren procesos de degradación lentos, generan olores desagradables y no logran destruir la materia orgánica. Comprenden que ciertas opciones necesitan de un método complementario para estabilizar los lodos cumpliendo con las normativas elevando sus costos. La Tabla 2 especifica las principales ventajas y desventajas de acuerdo con cada tecnología antes mencionada, mediante un análisis comparativo.

Tabla 2 - Ventajas y desventajas comparativas de las tecnologías de las alternativas tradicionales.

Técnicas/tecnologías	Ventajas	Desventajas	Referencias
Espesamiento	<ul style="list-style-type: none"> • Costos operativos a bajo precio. • Reducción del volumen de lodos generados. • Optimización de procesos posteriores. 	<ul style="list-style-type: none"> • Utilización de áreas extensas o grandes. • Susceptibilidad a olores generados. • Minimización de eficacia para altas concentraciones de sólidos. 	Abu <i>et al.</i> , 2013
Digestión anaerobia	<ul style="list-style-type: none"> • Producción de biogás. • Reducción primordial de volumen de lodos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Inversión económico alto. • Delicadeza en procedimiento de microorganismos. 	Barrera <i>et al.</i> , 2007

	<ul style="list-style-type: none"> • Estabilización de materia orgánica. • Eliminación de agentes patógenos. • Reducción de gasto energético. • Elaboración de fertilizante. 	<ul style="list-style-type: none"> • Prolongación inicial extensos. • Generación de malos olores. • Especificación de manejo de residuos. • Importancia de inspección continua. 	
Digestión aerobia	<ul style="list-style-type: none"> • Disminución de mayor capacidad de olores. • Minimización de lodos. • Inversión de bajo presupuesto. • Manual de operación y control fácil. • Producción de biosólidos de alta calidad. 	<ul style="list-style-type: none"> • Mayor consumo energético. • Eliminación de energía (biogás). • Generación de calor al mayor. • Concentraciones orgánicas sensibles. 	Macías, 2013
Tratamiento químico	<ul style="list-style-type: none"> • Minimización y eficacia de volumen en deshidratación. • Erradicación completa de partículas delgadas y algunos contaminantes. • Saneamiento y estabilización. • Disminución de reacción corta. • Adaptabilidad operativa. 	<ul style="list-style-type: none"> • Uso de químicos y costos altos. • Producción de lodos contaminantes mayor concentración. • Consecuencias de efectos residuales y formación de subproductos. • Elevación de sal en lodos. • Eliminación ineficaz en la materia orgánica soluble. 	Tech, 2019
Incineración	<ul style="list-style-type: none"> • Disminución de volumen y masa del sólido (90%). • Destrucción masiva de agentes patógenos y contaminantes orgánicos. • Probabilidades de recuperación de energía como el calor y electricidad. • Reducción de usos de rellenos sanitarios. 	<ul style="list-style-type: none"> • Funcionamiento e inversión de alto costo. • Emisión de contaminantes hacia el ambiente. • Urgencia de un previo secado debido a un porcentaje de agua. • Tratamiento de cenizas debido a su generación. 	(Werther y Ogada, 1999)
Pirólisis	<ul style="list-style-type: none"> • Elaboración de productos únicos como es el gas, biochar y aceite pirolítico. • Reducción masiva de los lodos masa y volumen. • Mayor reducción de niveles de contaminación en las emisiones de incineración. • Alta probabilidad de recuperación de nutrientes y energía tal como el fosforo. • Uso como recuperación del suelo y su absorción que es el biochar. 	<ul style="list-style-type: none"> • Inversión y procedimientos altos en relación a su presupuesto. • Exigencia de un previo secado por su humedad. • Esta tecnología, técnica, o alternativa aún está en desarrollo en otras naciones. • Adecuado tratado y gestión en material final secundario: aceites y grasas. • Monitoreo, control y seguimiento preciso para evitar subproductos tóxicos. 	Iglesias <i>et al.</i> , 2018
Ozonización	<ul style="list-style-type: none"> • Gran eficacia al destruir la estructura celular de los lodos a la hora de deshidratación. • Los lodos biológicos se disminuyen en grandes cantidades. • Minimización de olor, materia orgánica y patógenos. 	<ul style="list-style-type: none"> • La producción del ozono y energía tiene un valor alto. • Se da <i>in situ</i> y el ozono tiene una reducción de uso para su vida útil. • Puede generar subproductos altamente tóxicos. 	Albuquerque <i>et al.</i> , 2008

Fuente: Autores.

3.10.2 Alternativas sustentables

El manejo de los residuos sólidos y el tratamiento de los lodos residuales representa una de las fases más costosas en el proceso de depuración del agua, por tal motivo resulta primordial desarrollar alternativas de estabilización o tratamientos que sean a su vez económicos como sostenibles en el campo de la gestión de residuos.

Compostaje: proceso que implica la descomposición aeróbica, termófila y controlada de los microorganismos, del cual estabilizan la materia orgánica, transformándola en un nuevo recurso tal manera genera un material estable, inofensivo, de color marrón y con un olor característico a humus (Gao *et al.*, 2019; Huevo., 2011; Pan *et al.*, 2018).

Lombricultura: la vermicultura es una biotecnología que utiliza exclusivamente lombrices, como la roja californiana (*Eisenia foetida*) o la roja africana (*Eudrilus sp.*). Estas especies, junto con microorganismos, modifican las propiedades físicas, químicas y microbiológicas de los lodos a través de su digestión, de tal manera logran transformar los lodos en productos libres de contaminantes conteniendo una mayor concentración de nutrientes (Albornoz & Ortega, 2017; Rimassa, 2019).

Figura 15 - Alternativas sostenibles compost y lombricultura.



Fuente: Compost y Lombricultura.

Tanto las alternativas sostenibles como las convencionales tienen sus propias ventajas y desventajas. El compostaje, por ejemplo, necesita grandes extensiones de terreno con un suministro constante de aire, de cual sus procesos de degradación son lentos y los costos operativos son moderados, si bien el producto final es de alta calidad para usos agrícolas. Por otro lado, la lombricultura es económicamente viable, sencilla de operar por ende requiere monitoreos constantes exigiendo un pretratamiento de los lodos que contienen metales pesados o productos farmacéuticos. A continuación, en la Tabla 3 se presentan ventajas y desventajas de los mencionados procesos.

Tabla 3 - Ventajas y desventajas de alternativas sustentables.

Técnicas/tecnologías	Ventajas	Desventajas	Referencias
Compostaje	<ul style="list-style-type: none"> Elaboración de fertilizantes orgánicos para mejorar el uso agrícola como la fertilidad, nutrientes del suelo. Técnica de bajo costo, simple y gestión sencilla. Poca utilización de energía a diferencia de otras alternativas térmicas. Indispensable a su valorización y reutilización de los desechos orgánicos. 	<ul style="list-style-type: none"> Es necesario la utilización de grandes áreas físicas y del factor tiempo prolongado. Generación de olores y magnetismo de vectores si no se gestiona de manera adecuada. Concentraciones altas de metales pesados entre otros contaminantes. Es indispensable e importante una mezcla adecuada de carbono/ nitrógeno, más el manejo del porcentaje de humedad. Depende del uso limitado por los estándares y normativas sobre la calidad del compost. 	Cunha <i>et al.</i> , 2018
Lombricultura	<ul style="list-style-type: none"> Transformación de lodos a humus de lombriz Representa un abono orgánico de alta calidad. Su presupuesto de bajo costo tanto en sus etapas de operación y tecnologías. Eliminación de olores y patógenos. No produce emisiones de alta valor contaminante. Eficacia a la hora de ingresos debido a la venta de lombrices y vermicompost. 	<ul style="list-style-type: none"> Ciertas lombrices son frágiles y delicados a ciertos contaminantes. Es necesario adaptar condiciones ambientales gestionables como su temperatura, pH, etc. Esta tecnología no es permitida para lodos con concentraciones elevadas de toxicidad o generados por actividades industriales. Su procedimiento y operación es de manera lenta. Es necesario un procedimiento previo que es la separación de materiales inorgánicas y no degradables. 	Gezer y Cooper, 2009

Fuente: Autores.

4. Conclusión

La presente investigación bibliográfica analizó las propiedades fisicoquímicas (pH, materia orgánica, fósforo, nitrógeno, conductividad eléctrica y relación C/N) de lodos residuales provenientes del tratamiento de aguas residuales domésticas, comparándolas con datos nacionales e internacionales (2000-2025). Los resultados revelan variaciones significativas que exigen métodos de estabilización específicos, adaptados a las características únicas de los lodos residuales. El estudio evaluó técnicas convencionales (espesamiento, digestión anaerobia/aeróbica, tratamiento químico, incineración, pirólisis, ozonización, deshidratación) y sostenibles (compostaje, lumbricultura), concluyendo que no existe un método universal sino diferentes tecnologías que se diferencian por su costo. La eficacia depende de la composición de los lodos, los recursos disponibles, el impacto ambiental y las normativas locales, como el Reglamento al Código Orgánico del Ambiente en Ecuador. Por ejemplo, el compostaje y la lumbricultura son ideales para lodos ricos en materia orgánica y nutrientes, mientras que la digestión anaerobia y el tratamiento químico son más efectivos para lodos con altos contaminantes. Una gestión inadecuada de estos lodos residuales puede provocar contaminación por metales pesados, patógenos y compuestos orgánicos persistentes, afectando suelos, aguas y seguridad alimentaria. Por ello, la presente investigación enfatiza la necesidad de métodos eficaces y sostenibles que minimicen riesgos y promuevan su reutilización agrícola o en restauración de suelos. Por tanto, para aplicaciones a gran escala se sugiere avanzar en tecnologías rentables y evaluar impactos a largo plazo para optimizar la gestión de lodos residuales.

Referencias

- Abu Orf, M., Tchobanoglous, G., Stensel, H. D., Tsuchihashi, R., Burton, F., y Pfrang, B. (2013). *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery*.
- Afrin, H. (2017). A Review on Different Types Soil Stabilization Techniques. *International Journal of Transportation Engineering and Technology*, 3(2), 19. <https://doi.org/10.11648/j.ijtet.20170302.12>
- Albornoz Pineda, A. M., & Ortega Valencia, E. M. (2017). Evaluación de la Eficiencia de la Lombriz Roja Californiana E. foetida para Estabilización de Lodos Residuales de la PTAR Salitre. <https://hdl.handle.net/11634/2864>
- Albuquerque, J., Domingos, J., Sant'Anna, G., & Dezotti, M. (2008). Application of ozonation to reduce biological sludge production in an industrial wastewater treatment plant. *Water science and technology: a journal of the International Association on Water Pollution Research*, 58, 1971-1976. <https://doi.org/10.2166/wst.2008.554>
- Álvarez, J., Amutio, M., López, G., Barbarias, I., Bilbao, J., & Olazar, M. (2015). Sewage sludge valorization by flash pyrolysis in a conical spouted bed reactor. *Chemical Engineering Journal*, 273, 173-183. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.03.047>
- Ángeles de Paz, G. (2023). Development of bioaugmentation and sewage sludge composting technologies to remove emerging and priority pollutants while reducing their toxicity [Doctoral thesis, Universidad de Granada]. <https://digibug.ugr.es/handle/10481/84422>
- Appels, L., Baeyens, J., Degreè, J., & Dewil, R. (2008). Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge. *Progress in Energy and Combustion Science*, 34(6), 755-781. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2008.06.002>
- Barragán Sánchez, J., Coello Oviedo, M. D., Cruz Romero, F. J., & Quiroga Alonso, J. M. (2002). The establishment of new control parameters in the aerobic stabilisation of sludge; Establecimiento de nuevos parametros de control en la estabilización aerobia de lodos. *Tecnología del Agua*, 38. <https://www.osti.gov/etdeweb/biblio/20303511>
- Barrera, R. T., Pabello, V. M. L., Robles, A. N., Trejo, R. R., & Moreno, A. D. (2007). Instituto De Ingenieria, UNAM Y PTAR CERRO DE LA ESTRELLA.
- Bernat, K., Zaborowska, M., Zielińska, M., Wojnowska, I., & Ignalewski, W. (2021). Biological treatment of leachate from stabilization of biodegradable municipal solid waste in a sequencing batch biofilm reactor. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 18(5), 1047-1060. <https://doi.org/10.1007/s13762-020-02915-6>
- Berrio, J. (2022). Análisis del rendimiento de residuos industriales usados para la co-digestión anaerobia y producción energética en la planta de tratamiento de aguas residuales de la ciudad de Straubing en Alemania (SER GmbH). <https://hdl.handle.net/10495/31595>
- Boumalek, W., Kettab, A., Bensacia, N., Bruzzoniti, M. C., Othman, D. B., Mandi, L., Chabaca, M. N., & Benziada, S. (2019). Specification of sewage sludge arising from a domestic wastewater treatment plant for agricultural uses. *Desalination and Water Treatment*, 143, 178-183. <https://doi.org/10.5004/dwt.2019.23559>
- Burns, B., Krach, K., Cole, C., Mangus, J., Butler, H., & Li, B. (2007). Evaluation of Quicklime Incorporation in Bench-Scale and Full-Scale Lime Stabilized Biosolids Using a Flat Surface pH Electrode. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 57(7), 794-802. <https://doi.org/10.1080/1047-3289.57.7.794>
- Capodaglio, A. G., & Callegari, A. (2023). Energy and resources recovery from excess sewage sludge: A holistic analysis of opportunities and strategies. *Resources, Conservation & Recycling Advances*, 19, 200184. <https://doi.org/10.1016/j.reradv.2023.200184>

- Cárdenas, J. L., Silva, J. A., Pérez, A., & Torres, P. (2022). The Influence of Municipal Wastewater Treatment Technologies on the Biological Stabilization of Sewage Sludge: A Systematic Review. *Sustainability*, 14(10), Article 10. <https://doi.org/10.3390/su14105910>
- Castellanos, J., Merchán, N. A., Galvis, J. & Manjarres, E. H. (2018). Deshidratación de los lodos en lecho de secado y su influencia sobre la actividad biológica de los microorganismos. *Gestión y Ambiente*, 21(2), 242-251. <https://doi.org/10.15446/ga.v21n2.75876>
- Castillo, J. G., Balarezo Saltos, L. D., Vines Obando, M. B. & Zambrano Rizo, H. A. (2020). Alternativas en la estabilización de lodos provenientes de plantas de tratamiento de aguas residuales. *Revista de Investigaciones en Energía, Medio Ambiente y Tecnología: RIEMAT* ISSN: 2588-0721, 5(1), 23. <https://doi.org/10.33936/riemat.v5i1.2499>
- Cecconet, D. & Capodaglio, A. G. (2022). Sewage Sludge Biorefinery for Circular Economy. *Sustainability*, 14(22), Article 22. <https://doi.org/10.3390/su142214841>
- Chimbolema, J. G. L. (2025). Optimization of sewage sludge: An integrated approach to sustainable compost production. *Centrosur Agraria*, 1(24), Article 24.
- Choi, Y., Ryu, J. & Lee, S. R. (2020). Influence of carbon type and carbon to nitrogen ratio on the biochemical methane potential, pH, and ammonia nitrogen in anaerobic digestion. *Journal of Animal Science and Technology*, 62(1), 74-83. <https://doi.org/10.5187/jast.2020.62.1.74>
- Cortés, C. (2013). Tratamiento de agua residual urbana con salinidad variable [Doctoral thesis, Universidad de Granada]. <https://digibug.ugr.es/handle/10481/23760>
- Cunha, M., Romani, A., Carvalho, M., & Domingues, L. (2018). Boosting bioethanol production from Eucalyptus wood by whey incorporation. *Bioresource Technology*, 250, 256-264. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.11.023>
- Dede, C., Ozer, H., Dede, O. H., Celebi, A., & Ozdemir, S. (2023). Recycling Nutrient-Rich Municipal Wastes into Ready-to-Use Potting Soil: An Approach for the Sustainable Resource Circularity with Inorganic Porous Materials. *Horticulturae*, 9(2), 203. <https://doi.org/10.3390/horticulturae9020203>
- Di Capua, F., de Sario, S., Ferraro, A., Petrella, A., Race, M., Pirozzi, F., Fratino, U., & Spasiano, D. (2022). Phosphorous removal and recovery from urban wastewater: Current practices and new directions. *Science of The Total Environment*, 823, 153750. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153750>
- Díaz, A. A., Lorenzo, E. V., & Venta, M. B. (2015). Tratamiento de lodos, generalidades y aplicaciones. *Revista CENIC. Ciencias Químicas*, 46, 1-10.
- Do Carmo, A., Ebner, C., Gerke, F., Wehner, M., Robra, S., Hupfauf, S., & Bockreis, A. (2022). Residual municipal solid waste as co-substrate at wastewater treatment plants: An assessment of methane yield, dewatering potential and microbial diversity. *Science of The Total Environment*, 804, 149936. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149936>
- Dume, B., Hanc, A., Svehla, P., Michal, P., Chane, A. D., & Nigussie, A. (2023). Composting and vermicomposting of sewage sludge at various C/N ratios: Technological feasibility and end-product quality. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 263, 115255. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.115255>
- Farzadkia, M., & Mahvi, A. (2004). Comparison of Extended Aeration Activated Sludge Process and Activated Sludge with Lime Addition Method for Biosolids Stabilization. *Pakistan Journal of Biological Sciences*, 7(12), 2061-2065. <https://doi.org/10.3923/pjbs.2004.2061.2065>
- Gao, X., Tan, W., Zhao, Y., Wu, J., Sun, Q., Qi, H., Xie, X., & Wei, Z. (2019). Diversity in the Mechanisms of Humic Formation during Composting with Different Materials. *Environmental Science & Technology*, 53(7), 3653-3662. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b06401>
- Garcés, L. M. (2019). Decreto Ejecutivo 752 Registro Oficial Suplemento 507 de 12-jun.-2019 Estado: Vigente.
- Gezer, E. D., & Cooper, P. A. (2009). Factors affecting sodium hypochlorite extraction of CCA from treated wood. *Waste Management*, 29(12), 3009-3013. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.08.013>
- González, E., & José, M. (2020). Estudio comparativo del proceso de compostaje a escala industrial: Análisis metagenómico y vinculación con los parámetros críticos de control del proceso. <https://repositorio.ual.es/handle/10835/10879>
- Górka, J., Cimochoicz, M., & Poproch, D. (2022). Sludge Management at the Kraków-Plaszów WWTP—Case Study. *Sustainability*, 14(13), Article 13. <https://doi.org/10.3390/su14137982>
- Gualoto, J. J. (2017). Propuesta de Gestión de Lodos Residuales Municipales. Caso de Estudio: Planta de Tratamiento de Agua Residual de la Parroquia Rural de Nono [bachelorThesis, Quito, 2017.]. <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/17066>
- Han, F., & Zhou, W. (2022). Nitrogen recovery from wastewater by microbial assimilation – A review. *Bioresource Technology*, 363, 127933. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127933>
- Hassan, K., Senko, S., Villa, A., Grafova, E., Pappinen, A., & Kuittinen, S. (2023). Techno-economic evaluation of biofertilizer production using wastewater biosolids: Case study from municipal wastewater treatment plants in northwest region of Russia. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 25(6), 3380-3394. <https://doi.org/10.1007/s10163-023-01766-w>
- He, Q., Xie, Z., Tang, M., Fu, Z., Ma, J., Wang, H., Zhang, W., Zhang, H., Wang, M., Hu, J., & Xu, P. (2021). Insights into the simultaneous nitrification, denitrification and phosphorus removal process for in situ sludge reduction and potential phosphorus recovery. *Science of The Total Environment*, 801, 149569. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149569>
- Holguino, A., & Roman Salinas, V. (2021). Degradación anaeróbica de lodos de aguas residuales de la laguna de estabilización el espinar. *Revista de Investigaciones*, 10(3), 198-215. <https://doi.org/10.26788/riepg.v10i3.2841>
- Huezo S., L. A. (2011). Caracterización hidrológica y balance hídrico de la microcuenca Santa Inés, Honduras [Zamorano: Escuela Agrícola Panamericana, 2012.]. <https://bdigital.zamorano.edu/handle/11036/407>

- Iglesias, S., Ferreira, R., Carbia, J., & Iglesias, D. (2018). A review of thermodynamic cycles used in low temperature recovery systems over the last two years. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 760-767. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.049>
- INEN. Servicio Ecuatoriano de Normalización INEN – Ecuador. <https://www.normalizacion.gob.ec/>
- Jakubus, M., & Graczyk, M. (2024). Rate of Microelement Quantitative Changes during the Composting of Sewage Sludge with Various Bulking Agents. *Applied Sciences*, 14(15), 6693. <https://doi.org/10.3390/app14156693>
- Kacprzak, M., Neczaj, E., Fijałkowski, K., Grobelak, A., Grosser, A., Worwag, M., Rorat, A., Brattebo, H., Almås, Å., & Singh, B. R. (2017). Sewage sludge disposal strategies for sustainable development. *Environmental Research*, 156, 39-46. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.03.010>
- Khanh Nguyen, V., Kumar Chaudhary, D., Hari Dahal, R., Hoang Trinh, N., Kim, J., Chang, S. W., Hong, Y., Duc La, D., Nguyen, X. C., Hao Ngo, H., Chung, W. J., & Nguyen, D. D. (2021). Review on pretreatment techniques to improve anaerobic digestion of sewage sludge. *Fuel*, 285, 119105. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119105>
- Kumar, V., Chopra, A. K., & Kumar, A. (2017). A Review on Sewage Sludge (Biosolids) a Resource for Sustainable Agriculture. *Archives of Agriculture and Environmental Science*, 2(4), 340-347. <https://doi.org/10.26832/24566632.2017.020417>
- Latare, A. M., Kumar, O., Singh, S. K., & Gupta, A. (2014). Direct and residual effect of sewage sludge on yield, heavy metals content and soil fertility under rice-wheat system. *Ecological Engineering*, 69, 17-24. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.03.066>
- Li, C., Xie, S., You, F., Zhu, X., Li, J., Xu, X., Yu, G., Wang, Y., & Angelidaki, I. (2021). Heavy metal stabilization and improved biochar generation via pyrolysis of hydrothermally treated sewage sludge with antibiotic mycelial residue. *Waste Management*, 119, 152-161. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.09.050>
- Lian, Q., Qi, J., Huang, D., Song, W., & Yuan, J. (2025). Carbon to nitrogen ratio and organic loading rate optimization of sewage sludge and rice straw: Economic analysis and anaerobic digestion process understandings through machine learning. *Energy*, 330, 136789. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.136789>
- Limon, J. G. (2013). Los lodos de las plantas de tratamiento de aguas residuales, ¿problema o recurso? *Ingeniería Química*.
- Lin, Z., Wu, Z.-L., Sun, Z.-Y., Gou, M., Xia, Z.-Y., & Tang, Y.-Q. (2021). Aerobic post-treatment of anaerobic digested sludge with a focus on organic matter stability and the fate of antibiotic resistance genes. *Journal of Cleaner Production*, 289, 125798. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.125798>
- Luisa, A., Purificación, M., Luisa, R., & José, M. (2000). Contenido, evolución de nutrientes y productividad en un suelo tratado con lodos residuales urbanos. *Edafología*, 7, 21-29.
- Mahamud, M., Gutiérrez, A., & Sastre, H. (1996). Biosólidos generados en la depuración de aguas: (II). Métodos de tratamiento. *Ingeniería del agua*, 3(3). <https://doi.org/10.4995/ia.1996.2703>
- Major, N., Jechalke, S., Nesme, J., Goreta Ban, S., Černe, M., Sørensen, S. J., Ban, D., Grosch, R., Schikora, A., & Schierstaedt, J. (2022). Influence of sewage sludge stabilization method on microbial community and the abundance of antibiotic resistance genes. *Waste Management*, 154, 126-135. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.09.033>
- Malińska, K., Czekala, W., Janczak, D., Dach, J., Mazurkiewicz, J., & Drózd, D. (2018). Spent Mushroom Substrate as a Supplementary Material for Sewage Sludge Composting Mixtures. *Engineering and Protection of Environment*, 21(1), 29-38. <https://doi.org/10.17512/ios.2018.1.3>
- Marín Bahamón, D. (2019). Propuesta de aprovechamiento de lodos residuales provenientes de una PTAR del municipio de Sopó Cundinamarca para la producción de un fertilizante órgano-mineral. <https://hdl.handle.net/20.500.11839/7393>
- Medina, M. D. R., Negrete, M. D. L. X., Gámez Vázquez, F. P., Álvarez Bernal, D., & Conde Barajas, E. (2020). La aplicación de lodos residuales afecta, a corto plazo, biomasa microbiana y su actividad en suelos sódicos. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*. <https://doi.org/10.20937/RICA.53425>
- Mininni, G., Blanch, A. R., Lucena, F., & Berselli, S. (2015). EU policy on sewage sludge utilization and perspectives on new approaches of sludge management. *Environmental Science and Pollution Research*, 22(10), 7361-7374. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-3132-0>
- Muñante Carrillo, K. A., Perca Machaca, D. D. R., Nina, R. J., Quispe Sucasaca, J. C., Alarcón Maquera, G. E., & Tirado Rebaza, L. U. M. (2022). Aprovechamiento de estiércol vacuno y pasto seco en la vermiestabilización de lodos residuales de la ptar (planta de tratamiento de aguas residuales) magollo. *Revista de Ciencia, Tecnología e Innovación*, 20(26), 163-178. <https://doi.org/10.56469/rcti.v20i26.712>
- Nieves, J. B. C., & González, A. F. P. (2023). Efecto de la conductividad eléctrica a partir de la salinidad y sólidos disueltos en los procesos biológicos de nitrificación y desnitrificación para la remoción de compuestos nitrogenados en aguas residuales domésticas.
- Oliva, M., Vargas, F., & López, M. (2019). Designing the incineration process for improving the cementitious performance of sewage sludge ash in Portland and blended cement systems. *Journal of Cleaner Production*, 223, 1029-1041. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.147>
- Orlina, E. R., Mactal, A. G., Juico, P. P., Mason, M. L. T., Paragas, D. S., & Maquirang, J. D. (2024). Heavy Metal Levels and Target Hazard Quotients of Ipomoea aquatica Grown in Soils Applied with Stabilized Biosolids. *Universal Journal of Agricultural Research*, 12(1), 169-179. <https://doi.org/10.13189/ujar.2024.120116>
- Pachaiappan, R., Cornejo Ponce, L., Rajendran, R., Manavalan, K., Femilaa Rajan, V., & Awad, F. (2022). A review on biofiltration techniques: Recent advancements in the removal of volatile organic compounds and heavy metals in the treatment of polluted water. *Bioengineered*, 13(4), 8432-8477. <https://doi.org/10.1080/21655979.2022.2050538>
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R.,

- Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo, E., McDonald, S., ... Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372, n71. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
- Pan, J., Cai, H., Zhang, Z., Liu, H., Li, R., Mao, H., Awasthi, M. K., Wang, Q., & Zhai, L. (2018). Comparative evaluation of the use of acidic additives on sewage sludge composting quality improvement, nitrogen conservation, and greenhouse gas reduction. *Bioresource Technology*, 270, 467-475. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.09.050>
- Pasciucco, F., Pasciucco, E., Castagnoli, A., Iannelli, R., & Pecorini, I. (2024). Comparing the effects of Al-based coagulants in waste activated sludge anaerobic digestion: Methane yield, kinetics and sludge implications. *Heliyon*, 10(7), e29282. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e29282>
- Patel, S., Kundu, S., Halder, P., Ratnnayake, N., Marzbali, M. H., Aktar, S., Selezneva, E., Paz-Ferreiro, J., Surapaneni, A., De Figueiredo, C. C., Sharma, A., Megharaj, M., & Shah, K. (2020). A critical literature review on biosolids to biochar: An alternative biosolids management option. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 19(4), 807-841. <https://doi.org/10.1007/s11157-020-09553-x>
- Patel, S., Kundu, S., Halder, P., Rickards, L., Paz-Ferreiro, J., Surapaneni, A., Madapusi, S., & Shah, K. (2019). Thermogravimetric Analysis of biosolids pyrolysis in the presence of mineral oxides. *Renewable Energy*, 141, 707-716. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.04.047>
- Pereira A. S. et al. (2018). Metodologia da pesquisa científica. [free e-book]. Santa Maria/RS. Ed. UAB/NTE/UFSM
- Pérez Zúñiga, M. E. (2016). Tratamiento de lodos residuales procedentes de plantas de tratamiento de aguas residuales mediante procesos electroquímicos para la disminución de metales pesados (Pb) [bachelorThesis]. <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/12045>
- Reyes, D. Y., Mora, M. E., Lugo, J., & Del Águila, P. (2020). Estabilización por vermicomposteo de lodos residuales aplicados en la productividad de albahaca (*Ocimum basilicum* L.). *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 36(2). <https://doi.org/10.20937/RICA.53537>
- Rimassa, L. M. (2019). Propuestas de tratamiento de los lodos residuales de una planta de tratamiento de aguas residuales domésticas [bachelorThesis, Guayaquil: ULVR, 2019.]. <http://repositorio.ulvr.edu.ec/handle/44000/3486>
- Rodriguez, C. I., Duque, C., Calvache, M. L., & López Chicano, M. (2010). Causas de las variaciones de la conductividad eléctrica del agua subterránea en el acuífero de Motril-Salobreña, España. <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/245591>
- Rodríguez, I., Canet, R., Quiñones, A., & Pérez, A. (2023). Industrial-Scale Composting of Rice Straw and Sewage Sludge. *Agronomy*, 13(9), 2295. <https://doi.org/10.3390/agronomy13092295>
- Ruiz, R. (2017). Aprovechamiento del estiércol bovino generado en el municipio de Cumbal-Nariño para obtener energía renovable mediante digestión anaerobia. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/59752>
- Stegenta, S., Sobieraj, K., Rosik, J., Sidelko, R., Valentin, M., & Białowiec, A. (2022). The Development of Anammox and Chloroflexi Bacteria during the Composting of Sewage Sludge. *Sustainability*, 14(16), Article 16. <https://doi.org/10.3390/su141610248>
- Tamar, S. A., & Umer, M. I. (2022). Stabilization of Sludge in Zakho Municipal Wastewater by Anaerobic Digestion for Biogas Production in Kurdistan Region, Iraq. *Science Journal of University of Zakho*, 10(3), Article 3. <https://doi.org/10.25271/sjuoz.2022.10.3.924>
- Tech, G. W. (2019, abril 16). Pros y contras de los métodos de tratamiento de aguas residuales: Coagulación y desinfección. *Genesis Water Technologies*. <https://es.genesiswatertech.com/entrada-en-el-blog/Pros-y-contras-de-los-m%C3%A9todos-de-tratamiento-de-aguas-residuales-desinfecci%C3%B3n-de-la-coagulaci%C3%B3n/>
- Torres, P., Madera, C., & Silva, J. (2009). Eliminación de Patógenos en Biosólidos por Estabilización Alcalina / Eliminating pathogens in biosolids by alkaline stabilization. *Acta agronomica*, 58, 197-205.
- Tulun, S., Y & Bilgin, M. (2019). Enhancement of anaerobic digestion of waste activated sludge by chemical pretreatment. *Fuel*, 254, 115671. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.115671>
- USA EPA, O. (2019). Land Application of Biosolids [Overviews and Factsheets]. <https://www.epa.gov/biosolids/land-application-biosolids>
- Werther, J., & Ogada, T. (1999). Sewage sludge combustion. *Progress in Energy and Combustion Science*, 25(1), 55-116. [https://doi.org/10.1016/S0360-1285\(98\)00020-3](https://doi.org/10.1016/S0360-1285(98)00020-3)
- Wiśniewska, M., & Szyłak-Szydłowski, M. (2021). The Air and Sewage Pollutants from Biological Waste Treatment. *Processes*, 9(2), 250. <https://doi.org/10.3390/pr9020250>
- Wu, Y., Lu, M., Liu, X., Chen, H., Deng, Z., Fu, Q., Wang, D., Chen, Y., & Zhong, Y. (2022). Insights into how poly aluminum chloride and poly ferric sulfate affect methane production from anaerobic digestion of waste activated sludge. *Science of The Total Environment*, 811, 151413. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151413>
- Yu, B., Xu, J., Yuan, H., Lou, Z., Lin, J., & Zhu, N. (2014). Enhancement of anaerobic digestion of waste activated sludge by electrochemical pretreatment. *Fuel*, 130, 279-285. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.04.031>
- Yupanqui Pacheco, K., Espinoza Rojas, W. I., Alhúa Lozano, B. J., & Cornejo Tueros, J. V. (2024). Reingeniería y optimización de los procesos de la planta de tratamientos de aguas residuales "Doris Mendoza". *Prohominum*, 6(1), 134-150. <https://doi.org/10.47606/ACVEN/PH0233>
- Zhai, S., Zhang, D., Liu, W., Wang, B., Liang, B., Liu, C., Zeng, R., Hou, Y., Cheng, H.-Y., & Wang, A. (2023). Microbial electrochemical technologies assisted nitrogen recovery from different wastewater sources: Performance, life cycle assessment, and challenges. *Resources, Conservation and Recycling*, 194, 107000. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107000>

Zhao, S., Zheng, Q., Wang, H., & Fan, X. (2024). Nitrogen in landfills: Sources, environmental impacts and novel treatment approaches. *Science of The Total Environment*, 924, 171725. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171725>

Zheng, Y., Wang, P., Yang, X., Lin, P., Wang, Y., Cheng, M., & Ren, L. (2022). Process Performance and Microbial Communities in Anaerobic Co-digestion of Sewage Sludge and Food Waste with a Lower Range of Carbon/Nitrogen Ratio. *BioEnergy Research*, 15(3), 1664-1674. <https://doi.org/10.1007/s12155-021-10357-2>

Zigmontienė, A., & Šerevičienė, V. (2023). Nitrogen sequestration during sewage sludge composting and vermicomposting. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, 31(2), 157-XXX. <https://doi.org/10.3846/jeelm.2023.19298>