

# Alternativas para tratar lodos originados en sistemas de tratamiento de aguas residuales: una revisión

## *Alternatives to Treat Sludge from Sewage Treatment Plants: A Review*

**Geraldine Cárdenas Torrado**<sup>1</sup>, **Francisco José Molina Pérez**<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Magíster en Gestión Ambiental, Universidad de Antioquia (Medellín, Colombia), <sup>2</sup>Doctor en Ingeniería Química y Ambiental, Universidad de Antioquia (Medellín, Colombia)

Correspondence E-mail: geraldine.cardenast@udea.edu.co, francisco.molina@udea.edu.co

Received: 4th/May/2021. Modified: 15th/April/2022. Accepted: 16th/May/2022

### Abstract

**Context:** Research has shown the efficiency of various treatments for sludge. However, new alternatives have been presented which merit an updated review. That is why this work aims to carry out said update with regard to conventional and new techniques to treat sludge.

**Method:** The article is based on a review of documents in various databases, first grouping the conventional alternatives and later the new ones, both consisting of alternatives of sludge thickening, stabilization, and dewatering techniques, and analyzing them based on economic, technical, and environmental criteria.

**Results:** This study found that direct osmosis is one of the most promising alternatives in sludge thickening, supercritical water oxidation, and pyrolysis in stabilization and vacuum filtration during the dehydration of said byproducts.

**Conclusions:** This article allowed an updated review of conventional and new alternatives for sludge treatment, observing that, both in thickening and stabilization, the new alternatives are highly efficient, whereas vacuum filtration, a conventional alternative, improved its performance through the use of modified flocculants, standing out in the dehydration of sludge. This is why more research is required which improve the current challenges and yields and inquire into the release of pollutants into the environment when using biosolids.

**Keywords:** conventional alternatives, dehydration, thickening, stabilization, new alternatives, sludge treatment.

**Language:** spanish.

### Open access



Cite as: G. Cárdenas, F. Molina. "Alternativas para tratar lodos originados en sistemas de tratamiento de aguas residuales: una revisión". *Ing.*, vol. 27, no. 3, 2022. e17945.

<https://doi.org/10.14483/23448393.17945>

© The authors; reproduction right holder Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

## Resumen

**Contexto:** La investigación han demostrado la eficiencia de diversos tratamientos para lodos. Sin embargo, se han presentado nuevas alternativas que ameritan una revisión actualizada. Es por ello que este trabajo tiene como objetivo realizar dicha actualización con respecto a técnicas convencionales y nuevas para tratar los lodos.

**Metodo:** Este artículo está basado en una revisión de documentos en diversas bases de datos, agrupando en primera instancia las alternativas convencionales y posteriormente las nuevas, constituidas ambas por alternativas de técnicas de espesamiento, estabilización y deshidratación de lodos, y analizándolas con base en criterios económicos, técnicos y ambientales.

**Resultados:** En este estudio se encontró que la ósmosis directa es una de las alternativas más prometedoras en el espesamiento de lodos, la oxidación de agua supercrítica y la pirólisis en la estabilización y la filtración al vacío en la deshidratación de dichos subproductos.

**Conclusiones:** Este artículo permitió la revisión actualizada de alternativas convencionales y nuevas para el tratamiento de lodos, observando que, tanto en el espesamiento como en la estabilización, las nuevas alternativas tienen eficiencias altas, mientras la filtración al vacío, una alternativa convencional, mejoró su rendimiento mediante el uso del floculante modificado, destacándose en la deshidratación de lodos. Es por ello que se requieren más investigaciones que mejoren los desafíos y rendimientos presentes e indaguen sobre la liberación al ambiente de contaminantes al utilizar los biosólidos..

**Palabras clave:** alternativas convencionales, deshidratación, espesamiento, estabilización, nuevas alternativas, tratamiento de lodos

**Idioma:** español

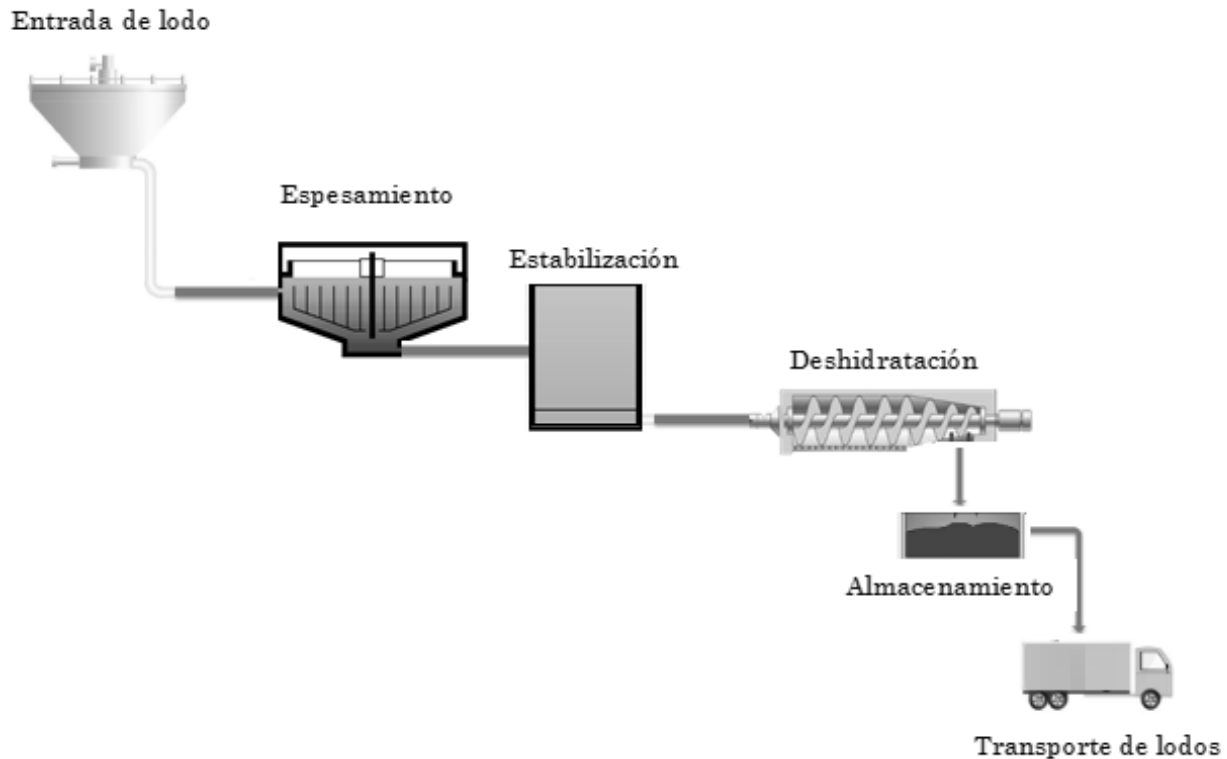
## 1. Introducción

Tratar las aguas residuales genera subproductos conocidos como lodos, cuya generación sigue aumentando con el paso de los años. Los lodos residuales son aquellos sólidos suspendidos en un líquido, mientras que los biosólidos son aquellas fracciones orgánicas de los lodos estabilizadas [1]. De igual forma, los lodos residuales necesitan reducciones del contenido de humedad [2] Dichos lodos son considerados en su mayoría como residuos contaminantes y la disposición de estos puede generar problemas ambientales y de salud pública al realizarse incorrectamente [3] Por lo tanto, se hace necesario estudiar diversas alternativas de tratamiento y realizar la evaluación cuidadosa de las características finales de los biosólidos como su pH, contenido de nutrientes y metales pesados, antes de su aprovechamiento o aplicación en los suelos.

Igualmente, el volumen de los lodos ha aumentado por el crecimiento poblacional de manera especial en áreas urbanas [4] y a pesar de que los lodos poseen compuestos constitutivos que presentan microorganismos, sustancias poliméricas extracelulares secretadas y contaminantes orgánicos [5], pueden valorizarse para la producción de biogás, materiales renovables o en la agricultura. Por lo cual, las alternativas de tratamiento están tomando mayor importancia, ya que permiten gestionar los lodos mediante el espesamiento, la estabilización y la deshidratación de los mismos para su posterior aprovechamiento [6]

La gestión de los lodos parte de una caracterización de los residuos con el fin de conocer las características fisicoquímicas y microbiológicas de ellos. Posteriormente, los lodos son extraídos para

recibir procesos de tratamiento que reduzcan la humedad y los contaminantes presentes, así como para valorizar su contenido de materia orgánica y nutrientes. Estos tratamientos pueden iniciar con un proceso de espesamiento, seguidamente se realiza la estabilización de los lodos para aprovechar la energía y los nutrientes, disminuir los microorganismos patógenos y los olores ofensivos, finalizando con la deshidratación, que reduce el exceso de humedad y facilita su transporte. Por último, los biosólidos pueden ser aprovechados en la agricultura, la enmienda a suelos o la valorización energética, dependiendo de sus características [7]. En la figura 1 se ilustra el esquema del tratamiento de lodos.



**Figura 1:** Esquema del tratamiento de lodos

Estudios recientes han demostrado la eficiencia de diferentes tratamientos para los lodos, sin embargo, se presentan nuevas alternativas que ameritan la realización de una revisión actualizada. Es por ello que este artículo ofrece una revisión sobre las alternativas de tratamiento convencionales y no convencionales, incluyendo sus ventajas y limitaciones, teniendo en cuenta criterios económicos, criterios técnicos como el rendimiento de las alternativas y criterios ambientales como la generación de olores ofensivos; cubriendo las operaciones y procesos de espesamiento, estabilización y deshidratación, y algunas opciones para el aprovechamiento de los biosólidos generados.

## 2. Metodología

Se revisó literatura orientada al tratamiento de los lodos. El número de documentos revisados estuvo alrededor de 220, de los cuales se encuentran 80 citados en el presente artículo. Para la selección de la información se tuvieron en cuenta criterios de inclusión como documentos publi-

cados a partir del año 2015, usando palabras claves como “tratamiento de lodos”, “estabilización de lodos”, “rendimiento de alternativas”, “espesamientos de lodos”, “deshidratación”, “reducción del volumen del lodo”, “impactos ambientales”, “consumo de energía”, tanto en idioma inglés como español. Así mismo, se establecieron criterios de exclusión como estudios que no proporcionaban datos relevantes, documentos sin rigor científico e investigaciones con poca claridad en la eficiencia de las alternativas de tratamiento estudiadas. La revisión de literatura inició con la fase preparatoria, accediendo a bases de datos como ScienceDirect, Taylor amp; Francis Online y SpringerLink. Posteriormente, en la fase descriptiva se tuvieron presentes características, ventajas y limitaciones de las alternativas de tratamiento, criterios económicos, criterios técnicos como el rendimiento de las mismas y criterios ambientales como generación de olores ofensivos, emisiones atmosféricas o consumo de energía. Además, se categorizó y ordenó la información con el fin de mejorar su interpretación, agrupando por una parte las alternativas convencionales y por otra parte las nuevas alternativas, constituidas ambas de técnicas de espesamiento, estabilización y deshidratación de los lodos. Seguidamente, en la fase interpretativa se analizaron las alternativas con base en los documentos más relevantes, sistematizando hallazgos, conceptos, eficiencias, dificultades y recomendaciones presentados por los autores de las investigaciones sobre las diferentes técnicas para el tratamiento de los lodos.

### **3. Resultados y discusión**

#### **3.1. Alternativas convencionales para el tratamiento de lodos residuales**

Con el fin de cumplir con los valores máximos permisibles fijados por diversas normatividades y disminuir los problemas asociados a los lodos como generación de olores ofensivos o la probabilidad de atraer vectores, se han estudiado e implementado alternativas convencionales para el tratamiento de ellos. Dichos tratamientos han estado enmarcados en la evaluación de técnicas para el espesamiento, la estabilización y la deshidratación de los lodos. No obstante, pese a que son tecnologías convencionales, actualmente se siguen evaluando con el fin de mejorar sus limitaciones. A continuación, se describen alternativas convencionales de espesamiento, estabilización y deshidratación.

##### **3.1.1. Alternativas de espesamiento de lodos**

Se han estudiado diversas técnicas para el tratamiento de lodos, sin embargo, muchas de ellas presentan limitaciones al analizarlas con base en criterios económicos, técnicos y ambientales. En la actualidad se siguen empleando y estudiando procesos convencionales de espesamiento, estabilización y deshidratación de lodos. Estos procesos no solo buscan disminuir el volumen de los lodos, sino eliminar los contaminantes y olores ofensivos. No obstante, procesos de espesamiento como el de gravedad, en donde los equipos giratorios con baja velocidad permiten que los lodos se sedimenten, presentan limitaciones en cuanto a la generación de olores ofensivos y el requerimiento de mayor área, aunque tienen un bajo costo de operación y mantenimiento, con bajo consumo energético. Además, el espesado por gravedad aumenta la cantidad de sólidos totales, pasando de 0,48 a 1,696 g/L, según una investigación realizada en México [8]. Actualmente se evalúan diversas opciones para optimizar su rendimiento, una de las alternativas es la adición de polímeros para mejorar el proceso de espesamiento por gravedad [9]. Evaluar el espesamiento, añadiendo

el polímero catiónico *Caesalpinia spinosa* y el polímero catiónico cloruro de polidialildimetilamónio, permite obtener espesamientos de 1,8 % de sólidos totales a 2,58 % con el primer polímero y de 1,8 % de sólidos totales a 2,68 % con el segundo polímero [10]. Ahora bien, el espesamiento por flotación de aire disuelto o DAF (*Dissolved Air Flotation*) basado en saturar con aire el agua, generando burbujas que atrapan las partículas del lodo para ser separadas de la fase líquida, presenta mayor eficiencia de separación entre los sólidos y líquidos que el espesamiento por gravedad, aunque tiene elevado costo y complejo mantenimiento. Dicho tratamiento, acoplado con el sistema de lodos activados de alta tasa, elimina el 78 % de los sólidos suspendidos totales influentes [11]. No obstante, el espesamiento por flotación de aire disuelto presenta un alto consumo energético y a diferencia del espesamiento por centrifugación, el tratamiento por DAF puede verse limitado por la generación de olores. Mientras que el espesamiento por centrifugación, aunque puede presentar una operación intermitente y altos costos operativos y de mantenimiento, no produce olores y maneja grandes cantidades de lodos en espacios pequeños [12]. Al mismo tiempo, la centrifugación permite no solo espesar los lodos, sino deshidratarlos, aunque es necesario estudiar su rendimiento mediante pruebas de laboratorio [13].

### 3.1.2. Alternativas de estabilización de lodos

Por otro lado, con el propósito de disminuir microorganismos patógenos y olores ofensivos, se estudian alternativas de estabilización [14]. En el caso de la estabilización con óxido de calcio, esta ofrece cambios extensos, además de ventajas sobre estabilizaciones como la digestión aerobia. La estabilización con óxido de calcio logra que la humedad se reduzca del 10 al 12 % y que el contenido orgánico oscile entre el 4 y el 9 %. Sin embargo, dichos resultados pueden variar de acuerdo con el contenido de cal añadida. El proceso fisicoquímico, aunque reduce los organismos patógenos en los lodos, elimina malos olores y minimiza su potencial de descomposición, aumenta la masa total y la alcalinidad de las estructuras orgánicas. Al mismo tiempo que la compra del material alcalino puede ser costosa. Es por ello que las alternativas convencionales son cada vez más estudiadas, esto con el fin de incorporar materiales o nuevos insumos que aumenten el rendimiento de ellas y permitan ampliar el aprovechamiento de los biosólidos obtenidos. En el caso de la estabilización con óxido de cal, resulta provechoso incorporar cenizas de aceite de palma con la finalidad de que dichos biosólidos sean aprovechados como materiales para la construcción, esto mediante la producción de agregados artificiales ligeros [15]. La adición de óxido de calcio es uno de los tratamientos más usados puesto que es un proceso simple, que además permite que los biosólidos sean aprovechados en la agricultura [16]. De igual forma, de los tratamientos usados en Irlanda, la estabilización con óxido de calcio es el tratamiento más popular por su bajo costo operativo, aunque requiere monitorear su pH [17].

Ahora bien, el uso de lombrices mediante la alternativa de vermicompostaje permite estabilizar los lodos con bajos costos de producción, siendo ideal en plantas pequeñas, aunque necesita altos contenidos de materia orgánica. El vermicompostaje, a diferencia de la estabilización con óxido de cal, puede estar limitado por la presencia de contaminantes en los lodos como metales pesados, los cuales inhiben la actividad de las lombrices. Sin embargo, algunos autores señalan que dicho vermicompostaje puede mejorar su rendimiento al usarlo con diversos materiales como paja y aserrín, arrojando reducciones del pH y el COT (carbono orgánico total), incluso eliminando metales pesados y mitigando su movilidad, mejorando el proceso de estabilización [18]. Es por ello que los lodos de

naturaleza peligrosa pueden requerir la adición de materiales aditivos como paja y aserrín con el fin de reducir la toxicidad de los metales pesados y que estos puedan ser asimilados por las lombrices, de modo que se evite la inactividad de ellas [19]. Por otra parte, el vermicompostaje puede proporcionar un producto aprovechable en la agricultura al igual que el tratamiento con óxido de cal [20]. No obstante, aunque el vermicompostaje produce abono esencial para la aplicación agrícola y fertilizantes mediante la actividad de las lombrices, esta alternativa emite óxido nitroso [21]. De igual forma, el rendimiento de dicha alternativa se ve influenciado por parámetros como un pH entre 5 y 8, y una humedad entre 40 y 55 %, puesto que al no cumplir con dichas especificaciones, los lodos se deben someter a un pretratamiento [22]. En ese sentido, al igual que las alternativas anteriores, la digestión anaerobia es una tecnología típica en la estabilización de los lodos, la cual degrada los sólidos, pero sin necesidad de oxígeno. Dicha digestión logra producir biogás utilizable como fuente de energía, aunque puede generar olores durante el proceso y no reducir los metales pesados presentes a diferencia del vermicompostaje, al ser estos liberados al suelo por procesos de lixiviación [23]. La digestión anaerobia evaluada junto con el compostaje aerobio ha permitido obtener tasas de degradación orgánica que varían entre el 0,5 y el 80,2 % al estudiarse en diferentes plantas. Estos tratamientos han permitido la disposición final segura de los biosólidos [24]. Por otra parte, la digestión aerobia, al igual que la anaerobia, es un método comúnmente utilizado en el tratamiento de los subproductos. La digestión aerobia degrada la materia orgánica en presencia de oxígeno, logrando la estabilización y la reducción del lodo. Dicho tratamiento, a comparación del anaerobio, tiene un menor costo para la construcción y es de fácil operación, aunque debido al requerimiento de aire, puede ser una alternativa costosa con un consumo de energía de 0,167 kWh/t (kilovatios hora por tonelada de lodo) [25]. Esta digestión puede generar cambios en los flóculos de los lodos empeorando las propiedades de deshidratación [26], aunque inactiva eficientemente los microorganismos patógenos y es usada en plantas de tratamiento medianas y pequeñas a diferencia de la estabilización con vermicompostaje [27]. Ahora bien, mientras la digestión anaerobia logra una reducción de los sólidos suspendidos totales (SST) del 66 al 86 %, la digestión aerobia logra una reducción de los SST del 57 al 76 %, demostrando un mejor rendimiento la digestión anaerobia [28]. Por otro lado, aunque comúnmente se estudian individualmente las estabilizaciones por digestión aerobia y anaerobia, se ha demostrado que combinar dichos tratamientos elimina microcontaminantes emergentes y convencionales, obteniendo biosólidos seguros para la reutilización en la agricultura, siendo eficiente en la estabilización de estos [29].

De igual forma, como se mencionó anteriormente, la digestión anaerobia se ha evaluado junto con el compostaje aerobio. Esto se debe a que el compostaje estabiliza los lodos mediante la degradación biológica en condiciones aerobias para obtener un producto estable, cuya alternativa es ecológica y de bajo costo. El compostaje no solo permite ser implementado con otras alternativas, sino que origina un sustrato llamado composta, el cual es usado en los suelos para mejorar su calidad [30]. Este compostaje aunque permite obtener un producto usado principalmente en la agricultura por su calidad, durante el proceso, al igual que con la digestión anaerobia, emite malos olores [31]. Además, el compostaje puede ser entendido como una tecnología limpia, aunque a menudo se descuida la liberación de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) [32]. Igualmente, en el compostaje se pueden generar productos finales con una menor calidad, debido a que las emisiones de amoníaco (NH<sub>3</sub>) pueden ocasionar la pérdida de nitrógeno superior al 50 % [33].

Sin embargo, existe una alternativa para tratar los lodos que no solo permite estabilizarlos, sino que reduce el volumen de los lodos y recupera energía. Esta alternativa es la incineración, la cual aunque permite controlar los parámetros antes mencionados, requiere de diseños eficientes para la recuperación energética, la reducción de las emisiones de gases efecto invernadero y la deshidratación previa de los lodos *in situ*, convirtiéndola en una alternativa costosa, además, de tener un alto consumo de energía [34].

### 3.1.3. Alternativas de deshidratación de lodos

Una vez los lodos son estabilizados, estos requieren recibir procesos de deshidratación que reduzcan la humedad de los mismos, haciendo fácil su manipulación [35]. La reducción de la humedad en los lodos disminuye el volumen de ellos y por ende el precio de eliminación [36].

Dentro de los tratamientos convencionales más usados en la deshidratación de los lodos, encontramos los lechos de secado, estos tratamientos suelen ser muy empleados debido a que son métodos simples y económicos [37]. Sin embargo, dichos sistemas de tratamiento pueden generar olores desagradables y lixiviados y necesitar grandes superficies para su funcionamiento, además de requerir gran cantidad de mano de obra para remover los lodos. En cuanto a su rendimiento, los lechos de secado, luego de implementarse por cinco meses, disminuyen 15,2 % la concentración de carbono orgánico presente en los lodos y reducen la actividad biológica de microorganismos aerobios y hongos, mientras los metales pesados se mantienen dentro del límite permisible [38]. Esta reducción del carbono orgánico puede estar asociada a la degradación de la materia orgánica [39]. Ahora bien, los lechos de secado se diferencian del secado térmico, ya que este último, aunque igualmente es un tratamiento común, representa un gran consumo de energía: entre 41 y 150 kWh/t y por ende grandes inversiones [40].

Por otra parte, algunas alternativas de deshidratación requieren que los lodos sean acondicionados previamente, puesto que su rendimiento se puede ver reducido, es el caso de los filtros prensa, los cuales forman parte de la deshidratación mecánica de los lodos [41]. En los filtros prensa se han usado acondicionadores como  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  (silicato sódico) con  $\text{FeCl}_3$  (cloruro de hierro), los cuales disminuyen el contenido de humedad. No obstante, si se desea mejorar aún más el proceso se pueden añadir cenizas volantes, logrando reducir la humedad el 45 % [40]. Los filtros prensa se diferencian de los lechos de secado por su consumo de energía. Dichos filtros tienen un consumo energético entre 40 y 60 kWh/t, al igual que los filtros al vacío [12]. Ambos filtros, por lo tanto, requieren de un alto consumo, aunque este es menor que el del secado térmico, al mismo tiempo que depende de las características de filtración, de las propiedades del lodo y del proceso de deshidratación [42]. El consumo energético de los filtros al vacío y los filtros prensa podría disminuir los porcentajes de uso de dichos tratamientos al aumentar los costos operativos, pero aunque los lechos de secado son alternativas muy usadas, los filtros al vacío igualmente tienden a ser muy utilizados, puesto que el agua es separada aplicando vacío mediante un medio poroso, obteniendo una remoción de la humedad del 65 al 85 % en un tiempo de 60 a 75 minutos, según la investigación realizada en un equipo piloto de filtración al vacío [43].

Al mismo tiempo, la centrifugación es también una de las alternativas que requiere que los lodos sean previamente acondicionados. La centrifugación, a pesar de tener un alto consumo de energía

de 60-80 kWh/t, una operación intermitente y altos costos operativos, puede mejorar su rendimiento al agregar polvo de carbón y aserrín, produciendo más porcentaje de sólidos de torta, aumentando en 43,8 y 24,6 el porcentaje, respectivamente. Además, este tratamiento reduce el 56 y el 89 % la humedad, respectivamente [13].

Por el contrario, mientras existen alternativas que usan medios mecánicos para deshidratar los lodos, los humedales requieren especies de plantas eficientes para el tratamiento de dichos subproductos. Estos humedales se distinguen por el poco consumo de energía, los bajos costos de mantenimiento y operación, y además de las ventajas antes mencionadas, los biosólidos obtenidos suelen ser empleados como fertilizantes agrícolas. No obstante, dichos biosólidos requieren la eliminación de contaminantes como metales pesados [44], además, los humedales necesitan grandes áreas para su implementación [45]. Igualmente, dichos sistemas disminuyen los nutrientes como nitrógeno y fósforo en los biosólidos, elementos importantes en la calidad de los subproductos. En cuanto a su rendimiento, este es calculado con base en el incremento en la concentración de los sólidos totales (ST), registrando valores de 24 a 31 % [46].

## 3.2. Nuevas alternativas para el tratamiento de lodos residuales

Las limitaciones de los tratamientos convencionales, junto con el desconocimiento de ciertos contaminantes como los emergentes, han propiciado el uso bien sea a escala de laboratorio o industrial, de nuevas alternativas para el tratamiento de los lodos. Implementar algunas de las nuevas tecnologías no implica el cambio total de las convencionales, sino procesos de reformulación con el fin de mejorar los rendimientos obtenidos. Es por ello que a continuación se describen nuevas alternativas de espesamiento, estabilización y deshidratación de lodos.

### 3.2.1. Alternativas de espesamiento de lodos

Con el fin de aplicar alternativas con bajo consumo energético, las cuales sean eficaces en el tratamiento de los lodos, se estudian técnicas como la ósmosis directa. Dicha alternativa tiene un consumo de energía máximo de  $0,276 \pm 0,033$  kWh/t, que depende de las condiciones operativas, aunque se evidencia que el consumo es menor al de las alternativas convencionales, promoviendo una reducción económica [47]. En cuanto a su rendimiento, la ósmosis directa impulsada por agua de mar concentra los lodos hasta 52,5 g/L en cada ciclo de operación. No obstante, esta tecnología utiliza una membrana que se ensucia durante el proceso de tratamiento disminuyendo el flujo del agua. Sin embargo, dicho problema ha disminuido con el uso del coagulante cloruro de polialuminio [48]. Este coagulante aumenta la permeabilidad de la membrana puesto que se reduce el contenido de sustancias poliméricas extracelulares [49]. Es por ello que los coagulantes han tomado importancia en el tratamiento de los lodos, logrando una separación entre el sólido-líquido eficiente [50]. Ahora bien, con base en investigaciones previas, se usan láminas planas y de fibra hueca para dicho espesamiento. Las fibras huecas pueden resultar favorables por su naturaleza mecánica autosuficiente; aunque, como se mencionó anteriormente, las membranas se ensucian constantemente. Es por ello que estudios han propuesto reducir el tamaño del poro en la membrana, sin embargo, se reduciría la permeabilidad de esta, optando por la adición de otra capa [51], puesto que la fabricación de una membrana de doble capa de fibra hueca demostraría una mejoría en la concentración de los lodos y en el ensuciamiento de ella [52].



### 3.2.2. Alternativas de estabilización de lodos

Una de las desventajas antes mencionadas en el tratamiento convencional de compostaje es que las emisiones de amoníaco pueden ocasionar pérdida de nitrógeno. Sin embargo, en la actualidad, la madera de pino modificada con ácido sulfúrico e hidróxido de sodio se implementa como agente de carga para disminuir hasta en un 9,4 % la pérdida de nitrógeno al reducir las emisiones de amoníaco [53]. También, el compostaje es implementado con la adición de larvas de escarabajos. Dichas larvas han permitido la reducción de algas en un 48,6 %, de coliformes totales en un 47,3 % y de salmonella y huevos de helminto en un 100% [54].

Además, con el fin de estabilizar metales pesados, eliminar olores, disminuir microorganismos patógenos y combatir y degradar contaminantes orgánicos persistentes, se estudian y emplean tratamientos a escala de laboratorio como la oxidación de agua supercrítica o SCWO (*Super-Critical Water Oxidation*). La SCWO no solo ofrece las ventajas antes mencionadas, sino que, a diferencia de algunos procesos convencionales, genera mayores productos y subproductos reutilizables como minerales, agua limpia, metales, CO<sub>2</sub> y calor, útil en la producción de energía. En cuanto a su rendimiento, la SCWO logra eliminar en los lodos el 99 % de la DQO y el 98 % de p-terc-butylcatecol, un compuesto orgánico recalcitrante agregado a los lodos provenientes del tratamiento de las aguas residuales en China, con el fin de evaluar la eficiencia de dicha alternativa de estabilización. No obstante, el tratamiento requiere operar en condiciones típicas con el fin de lograr una eliminación eficiente, siendo el calentamiento y la presurización pasos indispensables dentro del proceso de la SCWO que demandan altos consumos de energía, alrededor de 550 kWh/t [55]. Además, este tratamiento posee altos costos operativos ya que requiere presión y temperatura elevadas [56]. Sin embargo, el uso de reactores puede solucionar los problemas mencionados.

En China es estudiada e implementada la SCWO como un proceso combinado con gasificación de agua supercrítica o SCWG (*Super-Critical Water Gasification*) [57]. Esta última permite disponer sosteniblemente los biosólidos, al mismo tiempo ayuda a la degradación de compuestos como antibióticos y priones, la eliminación de bacterias o virus patógenos y recuperar nutrientes como nitrógeno y potasio [58]. La SCWG logra tratamientos con altos rendimientos, los gases de dicha alternativa contienen metano e hidrógeno con capacidad para producir energía. Al mismo tiempo, la SCWG no requiere que los lodos reciban un pretratamiento con el fin de disminuir el contenido de humedad a diferencia de la SCWO [59].

Por otro lado, existen alternativas como la del pretratamiento electroquímico, que al igual que la electrodeshidratación o EDW (*Electro-Dewatering*) son técnicas prometedoras. El pretratamiento electroquímico no solo permite estabilizar los lodos sino que los deshidrata, incluso con poca adición de productos químicos. Este tratamiento ofrece ventajas como la inactivación de patógenos como la *E.coli* y la *Salmonella spp* con un voltaje de 15 voltios (V), permitiendo la aplicación adecuada de los biosólidos en la agricultura [60]. Además, una de las mayores desventajas que han presentado diversos sistemas de estabilización ha sido la generación de olor, lo cual se mitiga con dicha alternativa al reducir el sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S) causante de olores ofensivos. Al mismo tiempo, el consumo de energía puede ser bajo, registrando valores de 13 kWh/t a 64 kWh/t con un voltaje de 12 voltios, reduciendo los costos económicos [61].

Con base en lo antes mencionado, tratar y disponer los lodos es uno de los problemas de los sistemas de tratamiento, bien sea por la normatividad vigente, los contenidos de humedad, los olores generados o los microorganismos patógenos [62]. Es por ello que la desinfección utilizando mecanismos como radiación solar y elevación del pH se viene implementando con el fin de eliminar organismos patógenos [63]. Y aunque la digestión aerobia y anaerobia es un método común en los tratamientos de lodos in situ, la desinfección de los organismos patógenos es muy lenta [64]. Por lo anterior, se implementa la desinfección de los lodos mediante tratamiento térmico eléctrico usando corriente continua (CC), ya que esta alternativa inactiva patógenos como la *E.coli* con concentraciones de NaCl (cloruro de sodio) y NH<sub>4</sub>Cl (cloruro de amonio), usados para mejorar la conductividad en la mezcla de los lodos. No obstante, el tratamiento térmico eléctrico usando corriente continua promueve la corrosión en los electrodos y, a pesar de que se comercializan electrodos anticorrosión, los costos pueden ser altos. Sin embargo, dicho tratamiento puede representar un bajo consumo de energía dependiendo del volumen de lodos a tratar, la concentración de las sales y el calor producido.

Ahora bien, en caso de no solo requerir que en los lodos se reduzcan los contaminantes orgánicos persistentes y se eliminen microorganismos patógenos, sino que además se estabilicen los metales pesados y se disminuya el volumen de los mismos, la pirólisis es la alternativa ideal [65]. La pirólisis además permite obtener productos como un bioaceite compuesto de hidrocarburos aromáticos, alifáticos, entre otros, el cual puede ser usado como materia prima en industrias, aunque se ha demostrado que utilizar el bioaceite puede liberar los contaminantes acumulados en él. De igual forma, dicha alternativa emite gases como metano, hidrógeno, monóxido y dióxido de carbono, los cuales son quemados para generar calor para la pirólisis [66] y un producto llamado biochar que se puede incinerar [67]. Dicho tratamiento puede representar altos costos por la instalación de equipos adicionales, además de requerir un alto consumo de energía de 118 MJ/t (megajulio o *megajoule* por tonelada de lodo), aunque se puede reducir con el uso de dispositivos asistidos por microondas [68].

### 3.2.3. Alternativas de deshidratación de lodos

Dentro de los tratamientos estudiados actualmente, encontramos la EDW por presión, la cual reduce el volumen de los poros al aplicar presión, extrayendo el agua del lodo, siendo útil por consumir menos energía que un proceso de electro-ósmosis. En dicha técnica se deshidratan mecánicamente los lodos y luego es aplicado el potencial eléctrico. Aunque la deshidratación mecánica ha sido estudiada considerablemente, aspectos de la EDW aún se desconocen. En la EDW se aumentan los sólidos secos y se reduce la concentración de *E.coli*, propiciando que los biosólidos se puedan aplicar a tierras agrícolas. En cuanto a su rendimiento, la EDW permite que el lodo alcance una sequedad del 31,3 % a 15 voltios y 43,9 % a 25 voltios. Sin embargo, dicha alternativa puede liberar enzimas de células muertas y carbono orgánico [69]. Al mismo tiempo, la temperatura del lodo influye en el consumo de energía, es por ello que a una temperatura de 50 °C se reduce el voltaje de 35 voltios a 15 voltios y se registra un consumo de energía de 108,23 kWh/t [70].

Otra de las alternativas estudiadas a escala de laboratorio es la oxidación Fenton, la cual es usada como una alternativa eficaz para la deshidratación y desinfección de los lodos, ya que reduce la concentración del COT (carbono orgánico total) a más del 50 % durante tres horas de

tratamiento [71]. El tratamiento Fenton logra reducir el contenido de humedad en los lodos al desintegrar los flóculos. Sin embargo, aún se siguen evaluando acondicionadores orgánicos naturales como *Moringa oleifera* (MO), el cual al ser añadido mejora la deshidratación de los lodos al aumentar el tamaño de la partícula. El Fenton-MO ha adquirido importancia dentro de los tratamientos de lodos al considerarse un método rentable, respetuoso y eficiente para la deshidratación de los mismos, con un costo razonable. Al mismo tiempo, este método aumenta la porosidad de los biosólidos, reduciendo del 73,86 al 61,82 % en peso del contenido de agua de la torta de lodo [72]. También, la humedad se reduce de 85,3 a 73,8 % con un pH de 5. Y a pesar de reducir la humedad y lograr desinfectar los biosólidos, se conservan los compuestos nutritivos, así como los materiales orgánicos esenciales en la producción de fertilizantes [73].

Los tratamientos de deshidratación requieren un mayor estudio con el fin de mejorar sus rendimientos, es por ello que diversos acondicionadores y floculantes se vienen analizando y aplicando en la actualidad. Dichos acondicionadores químicos aunque han sido utilizados para mejorar la deshidratación, durante su uso liberan iones inorgánicos, es por ello que los acondicionadores físicos como escorias, cenizas, entre otros, se estudian y desarrollan en la actualidad junto con los acondicionadores químicos, mejorando la permeabilidad de los biosólidos [74]. Un ejemplo de ello ha sido el uso del biochar de cáscara de arroz con cloruro férrico ( $\text{FeCl}_3$ ), combinación usada en el tratamiento de los lodos como acondicionador y deshidratante [75]. Con dicho acondicionador se ha logrado que la resistencia del lodo a la filtración disminuya en 97,9 % y la humedad del biosólido se reduzca del 96,7 al 77,9 % durante 6 minutos. Ahora bien, un recurso que puede resultar eficiente para elaborar biochar, por su contenido de carbono, es la paja de arroz, siendo un material de bajo costo [76].

De igual manera, el uso de floculantes químicos para la deshidratación de los lodos es común, aunque genera contaminación ambiental. Actualmente se estudian y usan floculantes para el pretratamiento de los lodos como el polvo de núcleo de maíz modificado con NaOH (hidróxido de sodio) y bromuro de cetiltrimetilamonio, los cuales reducen la humedad y la resistencia específica de filtración del lodo [77], siendo útil para el tratamiento de los subproductos por su simplicidad en la operación y bajo costo. Esta alternativa de tratamiento al usar núcleo de maíz para la deshidratación no causa impactos ambientales, debido a que el núcleo de maíz tiene alto valor de calentamiento y es de fácil biodegradabilidad. No obstante, este tratamiento requiere de condiciones óptimas de dosificación, velocidad de los lodos y tiempo de agitación. Implementar el tratamiento convencional utilizando filtración al vacío con el pretratamiento de polvo de núcleo de maíz modificado ha permitido que las resistencias específicas de filtración y el contenido del agua se reduzcan en un 55 y 40 % respectivamente.

Sin embargo, pese a que con los tratamientos de deshidratación anteriormente mencionados se logra reducciones de humedad, estos no consiguen la disolución de las sustancias poliméricas extracelulares, las cuales son importantes en la liberación del agua presente en los lodos. Por esta razón se utilizan tensoactivos en la deshidratación, permitiendo la liberación de las sustancias poliméricas extracelulares y que en la superficie de los subproductos se neutralice la carga negativa, aunque se requiere el uso de surfactantes para mejorar el proceso, los cuales pueden ser costosos. Es por ello que se estudia el uso del surfactante catiónico biodegradable esterquat de palma, utilizado en la liberación de lodos oleosos, alcanzando una pérdida de peso en el lodo aceitoso de

81,31 % con una concentración de esterquat de palma de 100 mg/L [78]. No obstante, los tensoactivos pueden causar contaminación secundaria, dando paso al estudio de los biotensoactivos, los cuales reducen la toxicidad [79].

El tratamiento Fenton, mencionado anteriormente, logra reducir el contenido de humedad en los biosólidos y es usado en combinación con acondicionadores orgánicos naturales, también puede combinarse con los tensoactivos, con el fin de mejorar la deshidratación de los lodos. La combinación entre el tensioactivo catiónico cloruro de dodecil dimetil bencil amonio y el tratamiento Fenton ha evidenciado mejoras en dicho proceso al permitir que el contenido de humedad en los biosólidos disminuya de 63,36 a 57,17 % [80].

### **3.3. ¿Alternativas convencionales o nuevas para el tratamiento de los lodos?**

Algunas alternativas para el tratamiento de los lodos, tanto convencionales como nuevas, no registran con certeza datos sobre consumo de energía, costos económicos o impactos ambientales. Por consiguiente, elegir una alternativa adecuada, bien sea de espesamiento, estabilización o deshidratación, puede producir incertidumbre.

No obstante, con base en los estudios antes mencionados sobre las alternativas de tratamiento convencionales y nuevas, el espesamiento por centrifugación puede ser una alternativa adecuada para grandes cantidades de lodos, además de no producir olores. Este, sin embargo, tiene altos costos operativos y de mantenimiento, al igual que el tratamiento de flotación de aire disuelto, por sus altos consumos de energía, mientras que el espesamiento por gravedad tiene poca eficiencia, habría que optar entonces por la ósmosis directa como una tecnología prometedora en el espesamiento de los lodos, con bajo consumo de energía en condiciones controladas. Al mismo tiempo, esta, con el fin de mejorar la concentración de los lodos y mitigar el ensuciamiento de la membrana, puede emplear coagulantes como el cloruro de polialuminio o utilizar una membrana de doble capa de fibra hueca.

La digestión anaerobia, a pesar de estar limitada para escalas pequeñas por su valor económico y su huella ambiental, suele ser empleada en la estabilización, ya que tiene un mejor rendimiento en cuanto a la eliminación de SST, a diferencia de la digestión aerobia. Esta última, además, presenta altos consumos de energía en contraste con la anaerobia. Por otro lado, implementar la digestión anaerobia junto con el compostaje permite contar con alternativas de estabilización que logran producir biogás y fertilizantes. Sin embargo, no logran degradar contaminantes orgánicos persistentes. Del mismo modo, aunque el tratamiento térmico eléctrico con CC (corriente continua) desinfecta los lodos, no se han encontrado investigaciones que permitan concluir que degradan dichos contaminantes orgánicos persistentes.

Es por ello que la pirólisis y la SWCO se usan en la actualidad, ya que logran estabilizar los lodos con contaminantes orgánicos persistentes. La pirólisis, por tal, es una alternativa prometedora para la eliminación y la estabilización de los lodos, ya que disminuye el volumen de estos, los microorganismos patógenos y estabiliza los metales pesados, además, se obtienen productos aprovechables a pesar de su alto consumo de energía, el cual se puede reducir con el uso de dispositivos asistidos por microondas. Al mismo tiempo, la SWCO, pese a que es experimentada a escala de laboratorio,

puede ser una alternativa prometedora para el tratamiento de los subproductos, puesto que estabiliza lodos con contaminantes orgánicos persistentes y metales pesados, aunque sus requerimientos operacionales demanden altos consumos de energía.

La filtración al vacío puede considerarse como una de las alternativas más prometedoras en la deshidratación de los lodos, en la cual, para reducir el consumo energético se deben tener en cuenta las características de filtración, las propiedades del lodo y el proceso de deshidratación. La filtración al vacío logra reducir la humedad entre el 65 y 85 %. Al mismo tiempo, permite mejorar su eficiencia al agregar floculantes como el polvo de núcleo de maíz modificado con NaOH y bromuro de cetiltrimetilamonio, los cuales reducen la resistencia específica de filtración del lodo. La tabla I resume las alternativas convencionales y nuevas para el tratamiento de los lodos, analizadas con base en criterios económicos, técnicos y ambientales.

**Tabla I:** Resumen de alternativas convencionales y nuevas para el tratamiento de los lodos

Tratamientos	Alternativas convencionales			
	Análisis de alternativas			Ref
	Criterios económicos	Criterios técnicos	Criterios ambientales	
Alternativas de espesamiento	Gravedad	*Bajo costo de operación y mantenimiento	*Requerimiento de mayor área para su implementación *Aumento de los sólidos totales de 0,48 a 1,696 g/L *Mejora del proceso con la adición de polímeros	*Generación de olores ofensivos *Consumo energético [8] [9] [10]
	Flotación de aire disuelto	*Elevado costo	*Complejo mantenimiento *Elimina el 78 % de los sólidos suspendidos totales	*Consumo energético *Generación de olores [11]
	Centrifugación	*Altos costos operativos	*Operación intermitente *Maneja grandes cantidades de lodos	*No genera olores ofensivos *Consumo energético [12] [13]
Alternativas de estabilización	Óxido de calcio	*Material alcalino costoso *Bajo costo operativo	*Humedad baja del 10 al 12 % *Contenido orgánico entre el 4 y 9 % *Reducción de organismos patógenos *Reducción del potencial de descomposición de los biosólidos *Aumento de la masa total *Proceso simple *Requiere monitoreo del pH	* No genera olores, los elimina [14] [15] [17]
	Vermicompostaje	*Bajos costos de producción	*Requerimientos como altas cantidades de materia orgánica *Eliminación y mitigación del movimiento de metales pesados *Influenciado por parámetros como pH entre 5 y 8 y una humedad entre 40 y 55 % *Producción de abono y fertilizantes *Ideal para plantas pequeñas	* Generación de óxido nitroso [18] [19] [20] [21] [22]

	Digestión anaerobia	*La construcción requiere un mayor costo a diferencia del aerobio	*Poca reducción de metales pesados en lodos *Reducción de los sólidos suspendidos totales (SST) del 66 al 86 % *Producción de biogás	*Generación de olores	[23] [24] [2] [8]
	Digestión aerobia	*La construcción requiere un menor costo a diferencia del anaerobio *Elevado costo por su consumo de energía	*Fácil operación *Consumo de energía de 0,167 kWh/t *Uso en plantas de tratamiento medianas y pequeñas *Reducción de SST del 57 al 76 %	*Consumo energético	[25] [27] [28]
	Compostaje	*Alternativa de bajo costo	*Producción de sustrato llamado composta *Reducción de nutrientes orgánicos por las emisiones	*Alternativa ecológica *Generación de olores ofensivos *Emisión de dióxido de carbono y amoníaco	[30] [31] [32] [33]
	Incineración	*Alternativa costosa por la necesidad de diseños eficientes	*Estabilización de lodos *Reducción del volumen de lodos *Recuperación de energía *Deshidratación previa de lodos in situ *Alto consumo de energía	*Emisión de gases *Consumo energético	[34]
Alternativas de deshidratación	Lechos de secado	*Alternativa de bajo costo	*Alternativa simple *Requerimientos como grandes superficies para su funcionamiento *Alta mano de obra *Disminución de concentración de carbono orgánico presente en lodos de 15,2 %	*Generación de olores ofensivos *Generación de residuos líquidos	[37] [38] [39]
	Secado térmico	*Grandes inversiones por requerimiento energético e instrumental	*Deshidratación de lodos *Consumo de energía entre 41 y 150 kWh/t	*Consumo energético	[40]
	Filtros prensa	*Altos costos operativos	*Acondicionamiento previo de lodos *Reducciones de humedad de 45 % *Consumo de energía entre 40 y 60 kWh/t	*Consumo energético	[12] [40] [41] [42]
	Filtración al vacío	*Altos costos operativos	*Consumo de energía entre 40 y 60 kWh/t *Remoción de humedad entre 65 y 85 %	*Consumo energético	[12] [42] [43]
	Centrifugación	*Altos costos operativos	*Consumo de energía de 60 a 80 kWh/t *Aumento de sólidos de torta del 43,8 % y 24,6 % al agregar polvo de carbón y aserrín *Reducción de humedad del 56 % y 89 % al agregar polvo de carbón y aserrín	*No genera olores ofensivos *Consumo energético	[12] [13]

	Humedales	*Bajos costos de mantenimiento y operación	*Requerimientos de plantas eficientes para tratamiento de lodos *Bajo consumo de energía *Grandes áreas para su implementación *Disminución de nutrientes como nitrógeno y fósforo en los biosólidos *Aumento en la concentración de SST, con valores de 24 a 31 %	*Consumo energético	[44] [45] [46]
<b>Nuevas alternativas</b>					
	<b>Tratamientos</b>	<b>Análisis de alternativas</b>			<b>Ref</b>
		<b>Criterios económicos</b>	<b>Criterios técnicos</b>	<b>Criterios ambientales</b>	
Alternativas de espesamiento	Ósmosis directa	*Bajos costos operativos por el poco consumo de energía	*Consumo de energía máximo de 0,276 ± 0,033 kWh/t *La ósmosis directa impulsada por agua de mar concentra los lodos hasta 52,5 g/L en cada ciclo de operación *Uso de coagulante para reducir ensuciamiento de la membrana *Fabricación de membrana de doble capa de fibra hueca para reducir ensuciamiento de la misma y aumentar la concentración de lodos	*Consumo energético	[47] [48] [49] [50] [51] [52]
	Oxidación de agua supercrítica	*Altos costos operativos	*Disminución de microorganismos patógenos *Degradación de contaminantes orgánicos persistentes y metales pesados *Generación de mayores productos y subproductos reutilizables *Eliminación de 99 % de DQO y 98 % de p-terc-butilcatecol en lodos *Altos consumos de energía de 550 kWh/t	*Eliminación de olores ofensivos *Consumo energético	[55] [56]
Alternativas de estabilización	Gasificación de agua supercrítica	*Altos costos operativos	*Degradación de compuestos como antibióticos *Eliminación de bacterias *Recuperación de nutrientes	*Consumo energético *Emisiones de metano e hidrógeno	[57] [58] [59]
	Pretratamiento electroquímico	*Bajos costos operativos al registrar consumos de energía entre 13kWh/t y 64kWh/t	*Estabilización y deshidratación de lodos *Inactivación de patógenos como E.coli y Salmonella spp	*Eliminación de olores ofensivos al reducir el sulfuro de hidrógeno	[60] [61]
	Tratamiento térmico eléctrico usando corriente continua	*Electrodos anticorrosión con altos costos	*Inactivación de patógenos como E.coli *Fomentación de la corrosión en los electrodos *Bajo consumo de energía	*Consumo energético	[64]

	Pirólisis	*Altos costos por instalación de equipos adicionales	*Estabilización de metales pesados *Eliminación de microorganismos patógenos *Combate de contaminantes orgánicos persistentes *Disminución de volumen de lodos *Obtención de productos como bioaceite *Alto consumo de energía de 118 MJ/t	*Eliminación de olores ofensivos *Emisiones de metano, hidrógeno, monóxido y dióxido de carbono* Consumo energético	[65] [66] [67] [68]
Alternativas de deshidratación	Electro deshidratación	*Altos costos por consumo de energía de 108 kWh/t	*Consume menos energía que un proceso de electroósmosis *Aumento de sólidos secos *Reducción de concentración de E.coli en los biosólidos *Sequedad de 31,3 % a 15 voltios y 43,9% a 25 voltios	*Consumo energético *Liberación de carbono orgánico	[60] [70]
	Fenton	*Alternativa con costo razonable	*Método rentable *Reducción del 73,86 al 61,82 % en peso del contenido de agua de torta de lodo *Reducción de humedad de 85,3 a 73,8 % *Reducción de concentración del COT (carbono orgánico total)	*Método respetuoso con el ambiente para deshidratar lodos (Fenton-MO)	[71] [72] [73]
	Tensioactivos	* El uso de surfactantes para mejorar el proceso puede ser costoso	*Deshidratación de lodos *Liberación de sustancias poliméricas extracelulares *Pérdida de peso en lodo aceitoso de 81,31% con el uso de surfactantes	*Contaminación secundaria	[78] [79]

## 4. Conclusiones

Las alternativas convencionales y nuevas de tratamiento de los lodos se ven influenciadas por el tipo de lodo a tratar, el conocimiento especializado sobre el uso eficiente de las alternativas, el uso de acondicionadores para mejorar la eficiencia, las áreas de implementación disponibles, la generación de olores ofensivos, la presencia de contaminantes, los costos económicos y el consumo energético. A pesar de las diferentes influencias o limitaciones que puedan presentar las alternativas de tratamiento, es necesaria su implementación, puesto que la disposición en el ambiente o el aprovechamiento de los lodos sin someterlos a procesos de tratamiento pueden contaminar cuerpos hídricos y el suelo con altas cargas de materia orgánica, microorganismos patógenos o metales pesados. Tratamientos como el espesamiento, la estabilización y la deshidratación se aplican en diversos países con el fin de reducir microorganismos, humedad, metales pesados y olores desagradables y, aunque comúnmente se emplean alternativas como la digestión anaerobia y aerobia para el tratamiento de los lodos in situ, la eliminación de los microorganismos patógenos puede ser muy lenta y algunos parásitos como los helmintos pueden seguir activos aún después del tratamiento, dando paso a la necesidad de investigar nuevas alternativas.



Por lo que técnicas como la pirólisis y la SWCO son discutidas como alternativas potenciales que estabilizan lodos que contienen contaminantes orgánicos persistentes y eliminan microorganismos patógenos, mientras que la ósmosis directa es una tecnología prometedoras en el espesamiento de los lodos.

Teniendo en cuenta la información antes mencionada, las nuevas alternativas como la ósmosis directa y la pirólisis junto con la SWCO son las que han demostrado un mejor rendimiento con base en esta revisión en el espesamiento y la estabilización de los lodos, respectivamente. No obstante, algunas de las alternativas novedosas solo se han estudiado a escala de laboratorio, limitando su aplicación a escala industrial. Mientras que el estudio de diversos pretratamientos ha permitido aumentar la eficacia de las alternativas convencionales. Un ejemplo de ello es la filtración al vacío, la cual ha demostrado un mejor rendimiento en la deshidratación de los lodos mediante el uso del floculante polvo de núcleo de maíz modificado con NaOH y bromuro de cetiltrimetilamonio.

Por otra parte, se siguen presentando desafíos en cuanto a la liberación de contaminantes con el uso de lodos y biosólidos, ya que algunos de estos contaminantes podrían acumularse o seguir presentes en los productos obtenidos en tratamientos como la pirólisis. Esto debido a que la pirólisis, a pesar de que permite obtener un bioaceite, podría generar problemas de contaminación ambiental. Paralelamente, se debe estudiar con mayor detalle el uso y los impactos ambientales de pretratamientos y acondicionadores, los cuales no solo son empleados para mejorar los rendimientos de las alternativas de deshidratación, sino que son utilizados en tratamientos de espesamiento y estabilización de los lodos.

## Referencias

- [1] J. Hu *et al.*, “Using a strong chemical oxidant, potassium ferrate (K<sub>2</sub>FeO<sub>4</sub>), in waste activated sludge treatment: A review”, *Environ. Res.*, vol. 188, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109764> ↑2
- [2] W. Zhang, Y. Xu, B. Dong, and X. Dai, “Characterizing the sludge moisture distribution during anaerobic digestion process through various approaches”, *Sci. Total Environ.*, vol. 675, pp. 184-191, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.095> ↑2, 14
- [3] M. B. Flandes y J. L. Soto, “Comparación de distintos métodos de secado (3) para lodos, de la planta de tratamiento de aguas residuales de San Jerónimo, del municipio de Purísima del Rincón, GTO”, *Jóvenes cienc.*, vol. 3, pp. 350-356, 2017. [En línea]. <http://www.jovenesenlaciencia.ugto.mx/index.php/jovenesenlaciencia/article/view/2314/1802> ↑2
- [4] H. Du, and F. Li, “Characteristics of dissolved organic matter formed in aerobic and anaerobic digestion of excess activated sludge”, *Chemosphere*, vol. 168, pp. 1022-1031, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.10.108> ↑2
- [5] Y. Chen, H. Chen, J. Li, and L. Xiao, “Rapid and efficient activated sludge treatment by electro-Fenton oxidation”, *Water Res.*, vol. 152, pp. 181-190, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.12.035> ↑2
- [6] M. Schnell, T. Horst, and P. Quicker, “Thermal treatment of sewage sludge in Germany: A review”, *J. Environ. Manage.*, vol. 263, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110367> ↑2
- [7] A. Amador-Díaz, E. Veliz-Lorenzo y M. Bataller-Venta, “Tratamiento de lodos, generalidades y aplicaciones”, *CENIC*, vol. 46, 2015. [En línea]. <https://www.redalyc.org/pdf/1816/181642434003.pdf> ↑3
- [8] A. Peña, *Balances de materia a una línea de lodos de una EDAR urbana*, Trabajo de pregrado, Escuela de Ingenierías Industriales, Universidad de Valladolid, Valladolid, España, 2019. [En línea]. <https://core.ac.uk/download/pdf/232122808.pdf> ↑4, 13, 14
- [9] S. E. Garrido, “Optimización de los procesos de tratamiento de residuos provenientes de la remoción de arsénico en agua para consumo humano”, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, México, Informe

- técnico, 2019. [En línea]. <http://repositorio.imta.mx/bitstream/handle/20.500.12013/2159/DP-1627.5.pdf> ↑4, 13
- [10] R. Cayo, “Evaluación de la eficiencia de Caesalpinia Spinosa (goma de tara) y polímero catiónico sintético (Polydamac) en el espesamiento de lodos por gravedad”, *VII Congreso Nacional de Investigación*, Perú, 2018. [En línea]. [http://eventoscientificos.upeu.edu.pe/index.php/viiconacin/vii\\_conacin/paper/view/4473](http://eventoscientificos.upeu.edu.pe/index.php/viiconacin/vii_conacin/paper/view/4473) ↑5, 13
- [11] C. Cagnetta et al., “High-rate activated sludge systems combined with dissolved air flotation enable effective organics removal and recovery”, *Bioresour. Technol.*, vol. 291, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121833> ↑5, 13
- [12] J. Suárez, A. Jácome y P. Ures, *Tecnologías de deshidratación de fangos*, Ficha técnica, Universidade da Coruña, La Coruña, España, 2015. ↑5, 7, 13, 14
- [13] S. Semiyaga, M. Okure, C. Niwagaba, P. Nyenje, and F. Kanssime, “Optimization of centrifuge operating conditions for dewatering physically conditioned fecal sludge from urban slums”, *Environ. Technol. Innov.*, vol. 8, pp. 28-39, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2017.03.005> ↑5, 8, 13, 14
- [14] B. Chatterjee, and D. Mazumder, “Anaerobic digestion for the stabilization of the organic fraction of municipal solid waste: A review”, *Environ. Rev.*, vol. 24, no. 4, pp. 426- 459, 2016. <https://doi.org/10.1139/er-2015-0077> ↑5, 13
- [15] P. C. Lau, D. C. L Teo, and M. A. Mannan, “Characteristics of lightweight aggregate produced from lime-treated sewage sludge and palm oil fuel ash”, *Constr. Build. Mater.*, vol. 152, pp. 558-567, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.022> ↑5, 13
- [16] V. Cortés et al., *Diseño de un sistema de tratamiento de aguas residuales para el 70% de la cabecera municipal de Cajamarca, Tolima*, Trabajo de pregrado, Facultad de Ingeniería, Pontificia Universidad Javeriana, Cali, Colombia, 2017. ↑5
- [17] M. G. Healy et al., “Metal concentrations in lime stabilized, thermally dried and anaerobically digested sewage sludges”, *Waste Manage.*, vol. 48, pp. 404-408, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.11.028> ↑5, 13
- [18] [18] Y. Zhang et al., “Effect of vermicomposting on concentration and speciation of heavy metals in sewage sludge with additive materials”, *Bioresour. Technol.*, vol. 218, pp. 867- 873, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.07.045> ↑5, 13
- [19] K. Sharma, and V. K. Garg, “Vermicomposting of Waste: A Zero-Waste Approach for Waste Management”, M. J. Taherzadeh, K. Bolton, J. Wong, and A. Pandey (Eds.), *Sustainable Resource Recovery and Zero Waste Approaches* (pp. 133-164), Elsevier, 2019. ↑6, 13
- [20] K. Malińska, M. Zabochnicka , R. Cáceres, and O. Marfà , “The effect of precomposted sewage sludge mixture amended with biochar on the growth and reproduction of *Eisenia fetida* during laboratory vermicomposting”, *Ecol. Eng.*, vol. 90, pp. 35-41, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.01.042> ↑6, 13
- [21] B. Lv, Y. Cui, H. Wei, Q. Chen, and D. Zhang, “Elucidating the role of earthworms in N<sub>2</sub>O emission and production pathway during vermicomposting of sewage sludge and rice straw”, *J. Hazard. Mater.*, vol. 400, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123215> ↑6, 13
- [22] S. L. Lim, L. H. Lee, and T. Y. Wu, “Sustainability of using composting and vermicomposting technologies for organic solid waste biotransformation: Recent overview, greenhouse gases emissions and economic analysis”, *J. Clean Prod.*, vol. 111, pp. 262-278, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.08.083> ↑6, 13
- [23] R. Solera, M. Pérez y D. Sales, “Biodegradación anaerobia de lodos y residuos agroalimentarios”, *Sem@foro*, no. 66, pp. 58-60, 2018. [En línea]. <https://www.semicrobiologia.org/wp-content/uploads/2021/04/25-Especial-Lodos.pdf> ↑6, 14
- [24] X. Mei, J. Tang, and Y. Zhang, “Sludge stabilization: Characteristics of the end- products and an alternative evaluative methodology”, *Waste Manage.*, vol. 105, pp. 355- 363, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.02.027> ↑6, 14
- [25] P. Foladori, M. Vaccari, and F. Vitali, “Energy audit in small wastewater treatment plants: methodology, energy consumption indicators, and lessons learned”, *Water Sci. Technol.*, vol. 72, no. 6, pp. 1007-1015, 2015. <https://doi.org/10.2166/wst.2015.306> ↑6, 14
- [26] S. Bahar, and A.S Ciggin, “A simple kinetic modeling approach for aerobic stabilization of real waste activated sludge”, *Chem. Eng. J.* vol. 303, pp. 194-201, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.05.149> ↑6

- [27] X. Zhu, W. Yuan, Z. Wu, X. Wang, and X. Zhang, “New insight into sludge digestion mechanism for simultaneous sludge thickening and reduction using flat-sheet membrane- coupled aerobic digesters”, *Chem. Eng. J.*, vol. 309, pp. 41-48, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.10.014> ↑6, 14
- [28] S. Teoh, and L. Y. Li, “Feasibility of alternative sewage sludge treatment methods from a lifecycle assessment (LCA) perspective”, *J. Clean Prod.*, vol. 247, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119495> ↑6, 14
- [29] M. C. Tomei, D. Mosca, G. Mascolo, and U. Kunkel, “Post-aerobic treatment to enhance the removal of conventional and emerging micropollutants in the digestion of waste sludge”, *Waste Manage.*, vol. 96, pp. 36-46, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.07.013> ↑6
- [30] M. Kumar et al., “Influence of medical stone amendment on gaseous emissions, microbial biomass and abundance of ammonia oxidizing bacteria genes during biosolids composting”, *Bioresour.Technol.*, vol. 247, pp. 970-979, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.09.201> ↑6, 14
- [31] M. Kumar et al., “Heterogeneity of zeolite combined with biochar properties as a function of sewage sludge composting and production of nutrient-rich compost”, *Waste Manage.*, vol. 68, pp. 760-773, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.06.008> ↑6, 14
- [32] C. P. Chien et al., “A review on the global warming potential of cleaner composting and mitigation strategies”, *J. Clean Prod.*, vol. 146, pp. 149-157, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.066> ↑6, 14
- [33] Y. Yang, M. Kumar, X. Ren, H. Guo, and J. Lv, “Effect of bean dregs on nitrogen transformation and bacterial dynamics during pig manure composting”, *Bioresour. Technol.*, vol. 288, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121430> ↑6, 14
- [34] D. Elalami et al., “Pretreatment and co-digestion of wastewater sludge for biogas production: Recent research advances and trends”, *Renew. Sust. Energ. Rev.*, vol. 114, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109287> ↑7, 14
- [35] [35] M. C. Torres, *Propuesta para el aprovechamiento de los lodos generados en la PTAR de la empresa regional Aguas del Tequendama*, Trabajo de pregrado, Facultad de Ingenierías, Fundación Universidad de América, Bogotá, Colombia, 2017. [En línea]. <https://repository.uamerica.edu.co/handle/20.500.11839/6593> ↑7
- [36] L. S. Tang, D. H. Zheng, Z. L. Zhao, and L. J. Zhang, “Dehydration of sludge using the polyethylene glycol solution dialysis method and the mechanism of dehydration”, *J. Environ. Sci. Health, Part A*, vol. 53, no. 14, pp. 1199-1206, 2018. <https://doi.org/10.1080/10934529.2018.1528009> ↑7
- [37] E. A. Medrano, *Diagnóstico y evaluación de la laguna de oxidación de la comunidad de Montoro a fin de reducir el impacto ambiental y la contaminación de la zona*, Trabajo de posgrado, Centro de Ciencias del Diseño y de la Construcción Aguascalientes, Universidad Autónoma de Aguascalientes, México, 2018. [En línea]. <http://bdigital.dgse.uaa.mx:8080/xmlui/handle/11317/1564> ↑7, 14
- [38] J. Castellanos, N. Merchán, J. Galvis y E. Manjarres, “Deshidratación de los lodos en lecho de secado y su influencia sobre la actividad biológica de los microorganismos”, *Gest. Ambient.*, vol. 21, no. 2, pp. 242-251, 2018. <https://doi.org/10.15446/ga.v21n2.75876> ↑7, 14
- [39] D. Santos, E. Teshima, S. Dias, R. Araújo y C. Silva, “Efeito da secagem em leito nas características físico-químicas e microbiológicas de lodo de reator anaeróbico de fluxo ascendente usado no tratamento de esgoto sanitário”, *Eng. Sanit. Ambient.*, vol. 22, no. 2, pp. 341-349, 2017. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522016100531> ↑7, 14
- [40] J. Zhang et al., “The study of Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> as conditioner used to deep dewater the urban sewage dewatered sludge by filter press”, *Sep. Purif. Technol.*, vol. 174, pp. 331-337, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2016.11.004> ↑7, 14
- [41] Y. Andrade y L. Castro, *Diseño hidráulico de una planta de tratamiento de agua residual en el hospital nuevo del municipio de Zipaquirá Colombia*, Trabajo de pregrado, Facultad de Ingeniería, Universidad Católica de Colombia, Bogotá, Colombia, 2017. [En línea]. <https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/15258/1/Dise%C3%B1o%20hidraulico%20de%20una%20PTAR%20ZIPAQUIRA.pdf> ↑7, 14
- [42] M. Huttunen et al., “Specific energy consumption of cake dewatering with vacuum filters”, *Miner. Eng.*, vol. 100, pp. 144-154, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2016.10.025> ↑7, 14
- [43] G. González y L. Prado, *Elaboración de equipo piloto a escala para el tratamiento de lodos residuales para determinar el porcentaje de humedad y la eficiencia del método*, Trabajo de pregrado, Facultad de Ciencias Matemáticas y Físicas, Universidad de Guayaquil, Guayaquil, Ecuador, 2019. [En línea]. <http://repositorio.ug.edu>

- [ec/handle/redug/42636](#) ↑7, 14
- [44] S. Hu, and Z. Chen, “Earthworm effects on biosolids characteristics in sludge treatment wetlands”, *Ecol. Eng.*, vol. 118, pp. 12-18, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.04.016> ↑8, 15
- [45] S. Hu et al., “Drained water quality in sludge treatment wetlands: Effects of earthworm densities and plant species”, *J. Clean Prod.*, vol. 247, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119128> ↑8, 15
- [46] S. Wang et al., “Deciphering of organic matter and nutrient removal and bacterial community in three sludge treatment wetlands under different operating conditions”, *J. Environ. Manage.*, vol. 260, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110159> ↑8, 15
- [47] S. M. Iskander, S. Zou, B. Brazil, J. T. Novak, and Z. He, “Energy consumption by forward osmosis treatment of landfill leachate for water recovery”, *Waste Manage.*, vol. 63, pp. 284-291, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2017.03.026> ↑8, 15
- [48] F. Sun, D. Lu, J. Shin, T. Haur, and Y. Zhou, “Mitigation of membrane fouling in a seawater-driven forward osmosis system for waste activated sludge thickening”, *J. Clean Prod.*, vol. 241, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118373> ↑8, 15
- [49] A. Ding et al., “In situ coagulation versus pre-coagulation for gravity-driven membrane bioreactor during decentralized sewage treatment: Permeability stabilization, fouling layer formation and biological activity”, *Water Res.*, vol. 126, pp. 197-207, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.09.027> ↑8, 15
- [50] [50] H. Wei, B. Gao, J. Ren, A. Li, and H. Yang, “Coagulation/flocculation in dewatering of sludge: A review”, *Water Res.*, vol. 143, pp. 608-631, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.07.029> ↑8, 15
- [51] G. Han, Z. Cheng, and T. Chung, “Thin-film composite (TFC) hollow fiber membrane with double-polyamide active layers for internal concentration polarization and fouling mitigation in osmotic processes”, *J. Membr. Sci.*, vol. 523, pp. 497-504, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2016.10.022> ↑8, 15
- [52] D. Y. Fan, B. Wu, Y. Chen, Z. Dong, and R. Wang, “A novel thin film composite hollow fiber osmotic membrane with one-step prepared dual-layer substrate for sludge thickening”, *J. Membr. Sci.*, vol. 575, pp. 98-108, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2019.01.007> ↑8, 15
- [53] Y. Liu, L. Ding, B. Wang, Q. He, and D. Wang, “Using the modified pine wood as a novel recyclable bulking agent for sewage sludge composting: Effect on nitrogen conversion and microbial community structures”, *Bioresour. Technol.*, vol. 309, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123357> ↑9
- [54] B. Pacheco, *Evaluación del proceso de biotransformación de biosólidos procedentes de la planta de tratamiento de agua residual de Tunja - Boyacá, mediante compostaje con adición de larvas de escarabajos*, Trabajo de posgrado, Universidad Santo Tomás, Tunja, Colombia, 2019. ↑9
- [55] F. Zhang et al., “Energy consumption and exergy analyses of a supercritical water oxidation system with a transpiring wall reactor”, *Energy Conv. Manag.*, vol. 145, pp. 82- 92, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.04.082> ↑9, 15
- [56] Z. Yan, B. Örmeci, Y. Han, and J. Zhang, “Supercritical water oxidation for treatment of wastewater sludge and recalcitrant organic contaminants”, *Environ. Technol. Inno.*, vol. 18, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.100728> ↑9, 15
- [57] L. Qian et al., “Treatment of sewage sludge in supercritical water and evaluation of the combined process of supercritical water gasification and oxidation”, *Bioresour. Technol.*, vol. 176, pp. 218-224, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.10.125> ↑9, 15
- [58] [58] E. Adar, M. Ince, and M. Sinan, “Supercritical water gasification of sewage sludge by continuous flow tubular reactor: A pilot scale study”, *Chem. Eng. J.*, vol. 391, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.123499> ↑9, 15
- [59] E. Adar, B. Karatop, M. İnce , and M. Sinan, “Comparison of methods for sustainable energy management with sewage sludge in Turkey based on SWOT-FAHP analysis”, *Renew. Sust. Energ. Rev.*, vol. 62, pp. 429-440, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.007> ↑9, 15
- [60] Q. Zeng et al., “Electrochemical pretreatment for stabilization of waste activated sludge: Simultaneously enhancing dewaterability, inactivating pathogens and mitigating hydrogen sulfide”, *Water Res.*, vol. 166, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.115035> ↑9, 15, 16
- [61] N. Shivasankaran, A. V. Balan, S. P. Sankar, S. Magibalan, and C. M. Dinesh, “Removal of hydrogen sulphide and odour from tannery amp; textile effluents”, *Mater Today Proc.*, vol. 21, no. 1, pp. 777-781, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.242> ↑9, 15
- [62] G. Zhou, Y. Gu, H. Yuan, Y. Gong, and Y. Wu, “Selecting sustainable technologies for disposal of municipal

- sewage sludge using a multi-criterion decision-making method: A case study from China”, *Resour. Conserv. Recy.*, vol. 161, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104881> ↑10
- [63] M. I. García, *Tratamiento de lodos residuales provenientes de plantas de tratamiento de aguas residuales mediante procesos electroquímicos para la disminución de la concentración de coliformes fecales y totales*, Trabajo de pregrado, Universidad Politécnica Salesiana del Ecuador, Cuenca, Ecuador, 2016. [En línea]. <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/12044/1/UPS-CT005866.pdf> ↑10
- [64] Z. Yin, M. Hoffmann, and S. Jiang, “Sludge disinfection using electrical thermal treatment: The role of ohmic heating”, *Sci. Total Environ.*, vol. 615, pp. 262-271, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.175> ↑10, 15
- [65] X. Liu *et al.*, “Pyrolysis and subsequent direct combustion of pyrolytic gases for sewage sludge treatment in China”, *Appl. Therm. Eng.*, vol. 128, pp. 464-470, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.08.091> ↑10, 16
- [66] D. Barry, C. Barbiero, C. Briens, and F. Berruti “Pyrolysis as an economical and ecological treatment option for municipal sewage sludge”, *Biomass Bioenerg.*, vol. 122, pp. 472-480, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.01.041> ↑10, 16
- [67] S. Nanda, A. K. Dalai, F. Berruti, and J. A. Kozinski., “Biochar as an exceptional bioresource for energy, agronomy, carbon sequestration, activated carbon and specialty materials”, *Waste Biomass.*, vol. 7, pp. 201-235, 2016. <https://doi.org/10.1007/s12649-015-9459-z> ↑10, 16
- [68] A. Zaker, Z. Chen, X. Wang, and Q. Zhang, “Microwave-assisted pyrolysis of sewage sludge: A review”, *Fuel Process. Technol.*, vol. 187, pp. 84-104, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2018.12.011> ↑10, 16
- [69] J. Rumky *et al.*, “Electro-dewatering treatment of sludge: Assessment of the influence on relevant indicators for disposal in agriculture”, *J. Environ. Manage.*, vol. 268, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110689> ↑10
- [70] H. Lv *et al.*, “Effects of temperature variation on wastewater sludge electro- dewatering”, *J. Clean Prod.*, vol. 214, pp. 873-880, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.033> ↑10, 16
- [71] [71] G. Vilardi, I. Bavasso, M. Scarsella, N. Verdone, and L. Di Palma, “Fenton oxidation of primary municipal wastewater treatment plant sludge: process modelling and reactor scale-up”, *Process Saf. Environ. Protect.*, vol. 140, pp. 46-59, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.05.002> ↑11, 16
- [72] M. C. Amie, K. Kai, S. Peng, and Y. Zhang, “Sludge dewaterability by dual conditioning using Fenton’s reagent with *Moringa oleifera*”, *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 7, no. 1, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.102838> ↑11, 16
- [73] N. Ding *et al.*, “Improving the dewaterability of citric acid wastewater sludge by Fenton treatment”, *J. Clean Prod.*, vol. 196, pp. 739-746, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.139> ↑11, 16
- [74] J. Guo, and C. Chen, “Sludge conditioning using the composite of a bioflocculant and PAC for enhancement in dewaterability”, *Chemosphere*, vol. 185, pp. 277-283, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.06.111> ↑11
- [75] Y. Wu *et al.*, “Possibility of sludge conditioning and dewatering with rice husk biochar modified by ferric chloride”, *Bioresour. Technol.*, vol. 205, pp. 258-263, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.01.020> ↑11
- [76] J. Li *et al.*, “Modification and use of biochar from wheat straw (*Triticum aestivum* L.) for nitrate and phosphate removal from water”, *Desalin. Water Treat.*, vol. 57, no. 10, pp. 4681-4693, 2016. <https://doi.org/10.1080/19443994.2014.994104> ↑11
- [77] Z. Guo *et al.*, “Dewatering performance of sewage sludge under pretreatment with modified corn-core powder”, *Sci. Total Environ.*, vol. 684, pp. 402-412, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.366> ↑11
- [78] S. W. Puasa, K. N. Ismail, M. Z. A. Musman, and N.A. Sulong, “Enhanced oily sludge dewatering using plant-based surfactant technology”, *Mater Today Proc.*, vol. 19, no. 4, pp. 1159-1165, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.11.009> ↑12, 16
- [79] R. Guan *et al.*, “Functionality of surfactants in waste-activated sludge treatment: A review”, *Sci. Total Environ.*, vol. 609, pp. 1433-1442, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.07.189> ↑12, 16
- [80] C. Hong, Z. Wang, Y. Si, Q. Yang, and Y. Xing, “Improving sludge dewaterability by combined conditioning with Fenton’s reagent and surfactant”, *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, vol. 101, pp. 809-816, 2017. <https://doi.org/10.1007/s00253-016-7939-0> ↑12

---

**Geraldine Cárdenas Torrado**

Ingeniera Ambiental de la Universidad Francisco de Paula Santander; Magíster en Gestión Ambiental de la Universidad de Antioquia. Integrante del Grupo de Investigación en Gestión y Modelación Ambiental - GAIA, Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia.

Correo electrónico: geraldine.cardenast@udea.edu.co

---

**Francisco José Molina Pérez**

Ingeniero Sanitario de la Universidad de Antioquia; Especialista en Ingeniería Ambiental de la Universidad de São Paulo; Magister en Ingeniería Sanitaria y Ambiental de la Universidad del Valle; Doctor en Ingeniería Química y Ambiental de la Universidad Santiago de Compostela; Docente de la Universidad de Antioquia; Coordinador del Grupo de Investigación en Gestión y Modelación Ambiental - GAIA, Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia.

Correo electrónico: francisco.molina@udea.edu.co