

# Universidad de La Laguna

Escuela Superior de Ingeniería y Tecnología

Departamento de Ingeniería Química y Tecnología Farmacéutica

## **MEJORA DE TRATAMIENTO PARA EL SECADO DE FANGOS DE UNA ESTACIÓN DEPURADORA DE AGUAS RESIDUALES**

Grado en Ingeniería Química Industrial

*Trabajo de fin de grado realizado por*

David Márquez García

*Bajo la supervisión del tutor*

Oliver Díaz López

Septiembre 2022



# Índice

1. Producción y caracterización de lodos procedentes de una depuradora de aguas residuales	3
1.1. Definición de lodos	3
1.2. Clasificación de los lodos	4
2. Reutilización de los lodos	6
2.1. Producción de lodos en España	7
2.2. Reutilización del fango como fertilizante	10
2.2.1. Propiedades del suelo	11
2.2.2. Efectos de los lodos de depuradora en el suelo	13
2.2.2.1. Efectos en las propiedades físicas del suelo	13
2.2.2.2. Efectos en las propiedades químicas del suelo	14
2.2.2.3. Efectos en las propiedades microbiológicas del suelo	16
2.3. Normativa de aplicación para su reutilización	16
2.3.1. Normativa europea para la reutilización del fango como fertilizante	17
2.3.2. Normativa española para la reutilización de los fangos	18
2.3.2.1. Real Decreto 1310/1990, de 29 de octubre	18
2.3.2.2. Real Decreto 506/2013, de 28 de junio	29
2.3.2.3. Real Decreto 865/2010, de 2 de julio	21
2.3.2.4. Orden AAA/1072/2013, de 7 de junio	22
2.4. Calidad requerida para su reutilización	22
2.5. Casos reales de reutilización como fertilizante	23
3. Tratamientos para la reutilización de los fangos: Espesamiento	27
3.1. Métodos de espesamiento	29
3.1.1. Sedimentación por gravedad en clarificados	29
3.1.2. Espesamiento por gravedad	29
3.1.3. Flotación por aire disuelto	30
3.1.4. Espesamiento centrífugo	31
3.1.5. Espesado por cinturón de gravedad	32
3.1.6. Espesamiento por tambor rotatorio	32
4. Tratamientos para la reutilización de los fangos: Estabilización	33
4.1. Métodos de estabilización	34
4.1.1. Estabilización alcalina	34
4.1.2. Digestión anaeróbica	35

4.1.3. Digestión aeróbica.....	36
4.1.4. Compostaje .....	37
5. Tratamientos para la reutilización de los fangos: Deshidratado.....	38
5.1. Métodos de deshidratación .....	39
5.1.1. Centrifugación en recipiente sólido .....	39
5.1.2. Prensa de filtro de banda .....	39
5.1.3. Filtro prensa de placas empotradas.....	40
5.1.4. Lecho de secado de lodos .....	41
5.1.5. Lagunas.....	44
6. Implantación de la reutilización de fangos en la EDAR de Valle de Guerra .....	46
6.1. Situación de la gestión de lodos en Canarias y línea de tratamiento propuesta .....	46
6.2. Descripción de la instalación actual de la EDAR de Valle de Guerra.....	48
6.2.1. Espesamiento .....	49
6.2.2. Deshidratado .....	49
6.3. Producción actual de fangos .....	52
6.4. Propuesta de línea de tratamiento de fangos.....	53
6.5. Diseño preliminar de la línea de reutilización.....	54
6.5.1. Diseño del proceso de estabilización anaeróbica .....	55
6.5.2. Diseño del proceso de secado solar .....	63
6.6. Viabilidad.....	67
7. Conclusiones.....	72
8. Conclusions.....	73
9. Referencias.....	74

# Índice de figuras

Figura 1 Composición de la materia seca de los lodos, 2019 (fuente Aldavero) .....	3
Figura 2 Origen de los lodos en función del tratamiento que recibe para un influente de procedencia urbana, 2019 (fuente Aldavero) .....	5
Figura 3 Principio de jerarquía en la gestión de los lodos de depuradora, 2016 (fuente Pérez)..	7
Figura 4 Producción de lodos en España, 2013-2018 (fuente INE) .....	8
Figura 5 Lodos destinados a sector agrario, 2018 (fuente INE) .....	9
Figura 6 Lodos destinados a incineración o valorización energética, 2018 (fuente INE).....	9
Figura 7 Lodos destinados a vertidos, 2018 (fuente INE) .....	10
Figura 8 Cambios producidos en el suelo tras la adición de lodos de depuradora, 2022 (fuente elaboración propia) .....	13
Figura 9 Planificación de gestión de lodos de la Comunidad Valenciana, 2022 (fuente elaboración propia) .....	23
Figura 10 Niveles de Nitrógeno en la cosecha de trigo, 1997 (Fuente Polo y col.).....	26
Figura 11 Niveles de Nitrógeno en la cosecha de lechuga, 2010 (Fuente Giménez) .....	27
Figura 12 Tanque de sedimentación primaria (Clarificador), 2010 (Fuente Belzona) .....	29
Figura 13 Espesador por gravedad (Fuente American Water Chemicals) .....	30
Figura 14 Sistema de flotación por aire disuelto, 2017 (Fuente Ozoniq).....	31
Figura 15 Sistema de espesamiento centrifugo, 1991 (Fuente Metcalf & Eddy) .....	31
Figura 16 Sistema de espesamiento por cinturón de gravedad, 1991 (Fuente Metcalf & Eddy)	32
Figura 17 Sistema de espesamiento por tambor rotatorio (Fuente Sefar).....	33
Figura 18 Sistema de estabilización alcalina, 1991 (Fuente Metcalf & Eddy).....	34
Figura 19 Etapas de un sistema de estabilización anaeróbica, 1991 (Fuente Metcalf & Eddy)..	35
Figura 20 Sistemas de digestión aerobia de tipo discontinua (izquierda) y continua (derecha), 1991 (Fuente Metcalf & Eddy) .....	36
Figura 21 Proceso de compostaje, 1991 (Fuente Metcalf & Eddy).....	37
Figura 22 Esquema de funcionamiento del método de deshidratación por prensa de filtro de banda, 2017 (Fuente Alfa Laval).....	40
Figura 23 Esquema de funcionamiento del método de deshidratación por filtro prensa de placas empotradas, 1991 (Fuente Metcalf & Eddy).....	40
Figura 24 Esquema de funcionamiento del método de deshidratación de lechos de secado de arena convencional, 2016 (Fuente Galeano y col).....	41
Figura 25 Esquema de funcionamiento del método de deshidratación de lechos de secado pavimentado, 1991 (Fuente Metcalf & Eddy) .....	42
Figura 26 Esquema de funcionamiento del método de deshidratación de lechos de secado artificial, 1991 (Fuente Metcalf & Eddy) .....	43

Figura 27 Esquema de funcionamiento del método de deshidratación de lechos de secado solar, 2016 (Fuente Interempresas).....	44
Figura 28 Esquema de funcionamiento de lagunas de secado de lodos, 2018 (Fuente Largo y col.).....	45
Figura 29. Línea de tratamiento de lodos para pequeñas EDAR en Canarias, 2013 (Fuente ITC) .....	47
Figura 30. Línea de tratamiento de lodos para EDAR con mayor caudal en Canarias, 2013 (Fuente ITC).....	47
Figura 31 Espesador por gravedad de EDAR de Valle de Guerra .....	49
Figura 32. Sistema de bombeo de lodos espesado de EDAR de Valle de Guerra .....	49
Figura 33 Sistema de preparación de polielectrolito de EDAR de Valle de Guerra .....	50
Figura 34 Sistema de deshidratación centrifuga de EDAR del noreste de Tenerife .....	51
Figura 35 Silo de almacenamiento de lodos de EDAR del noreste de Tenerife .....	51
Figura 36 Diagrama del diseño preliminar de la línea de reutilización de fangos .....	54
Figura 37 Gasómetro de doble membrana (Fuente catálogo Sattler Group).....	57
Figura 38 Características de microturbina modelo CAPSTONE CR65 (Fuente Micropower Europe).....	59
Figura 39 Digestión anaeróbica con cogeneración .....	60
Figura 40 Zona de instalación del digester anaeróbico en la EDAR de Valle de Guerra .....	61
Figura 41 Ubicación del gasómetro en la EDAR del noreste de Tenerife.....	62
Figura 42 Zona de microturbinas e intercambio de calor EDAR noreste de Tenerife.....	63
Figura 43 Zona propuesta para el emplazamiento del sistema de secado solar .....	64
Figura 44 Sistema de secado solar propuesto, 2020 (Fuente Lapuerta).....	65
Figura 45 Escarificador de lodo Wendewolf, 2022 (Fuente Wendewolf) .....	66
Figura 46 Generación de contaminación de una EDAR, 2022 (Fuente elaboración propia).....	68

# Índice de tablas

Tabla 1 Características del lodo primario y secundario, 2013 (fuente ITC) .....	6
Tabla 2 Destino de Lodos en España, 2013-2018 (fuente INE) .....	8
Tabla 3 Valores límite de microorganismos en fertilizantes orgánicos, 2019 (fuente BOE).....	17
Tabla 4 Valores mínimos de micronutrientes en fertilizante orgánicos, 2019 (fuente BOE).....	17
Tabla 5 Valores límite de concentraciones de metales pesados en lodos destinados a uso agrario en mg/kg de materia seca, 1990 (fuente BOE).....	18
Tabla 6 Valores límite de concentraciones de metales pesados en suelos en mg/kg de materia seca, 1990 (fuente BOE).....	19
Tabla 7 Valores límites para las cantidades anuales de metales pesados basados en media de diez años en kg/Ha/año, 1990 (fuente BOE).....	19
Tabla 8 Contenidos mínimos exigidos o declarables en fertilizantes, 2013 (fuente BOE).....	20
Tabla 9 Valores límite de concentraciones de metales pesados en distintas clases de fertilizante, 2013 (fuente BOE) .....	20
Tabla 10 Valores límite de microorganismos en fertilizantes, 2013 (fuente BOE) .....	20
Tabla 11 Valores límite de requisitos para uso de lodos como sustrato de cultivo, 2010 (fuente BOE).....	21
Tabla 12 Tratamientos ensayados ,2013 (fuente Irañeta y col.).....	24
Tabla 13 Contenido en metales pesados de las muestras de suelo de los distintos tratamientos ensayados (Última línea indica el límite establecido por el RD 1310/1990), 2013 (fuente Irañeta y col.) .....	24
Tabla 14 Análisis de suelo respecto a los parámetros de fertilidad, 2013 (Fuente Irañeta y col.) .....	24
Tabla 15 Lodos a tratar y ocurrencia de los distintos métodos de espesamiento, 1991 (Fuente Metcalf & Eddy).....	28
Tabla 16 Diferentes métodos de estabilización en función del grado de atenuación de parámetros relacionados con microorganismos, 1991 (Fuente Metcalf & Eddy) .....	33
Tabla 17 Descripción a modo de resumen de los procesos de estabilización, 1991 (Fuente Metcalf & Eddy).....	38
Tabla 18 Ventajas y desventajas de los métodos de secado de lodos, 1991 (Fuente Metcalf & Eddy).....	45
Tabla 19 Producción de lodos de EDAR en Canarias, 2013 (Fuente ITC) .....	46
Tabla 20 Tecnologías habituales para distintos tratamientos de lodos en Canarias, 2013 (Fuente ITC).....	48
Tabla 21 Características del agua de entrada al tratamiento secundario .....	52
Tabla 22 Parámetros referentes a la edad de lodos y el coeficiente de mayoración .....	53
Tabla 23 Temperaturas del agua de la red de Tenerife, 2010 (Fuente IDAE) .....	56

Tabla 24 Tiempo mínimo de almacenamiento y volumen del gasómetro .....	57
Tabla 25 Coeficiente punta y capacidad del quemador.....	57
Tabla 26 Dimensiones del gasómetro (Fuente catálogo Sattle Group) .....	58
Tabla 27 Microturbina modelo CAPSTONE CR 65, 2010 (Fuente Sanmartín).....	58
Tabla 28 Datos para el cálculo de la necesidad y poder calorífico del fango y biogás respectivamente .....	59
Tabla 29 Comparación de necesidades caloríficas del lodo y poder calorífico del biogás.....	60
Tabla 30 Radiaciones solares directas acumuladas y anuales, 2020 (Fuente Santana y col.)....	66
Tabla 31 Impacto cuantificado según el método Eco-indicator 99 (E) V2.05, 2014 (Fuente Blanco, D. y col.) .....	69
Tabla 32 Evolución del factor de emisión (tCO <sub>2</sub> eq/MWh) de cada isla, 2020 (Fuente ISTAC)....	69
Tabla 33 Comparación del transporte de lodos a verter para las distintas líneas de tratamiento, 2022 (Fuente elaboración propia).....	71

## Resumen

La producción de lodos es inherente al tratamiento de aguas residuales y al tratarse de un residuo peligroso debe ser tratado. Atendiendo a la normativa vigente en España, la gestión ideal pasa por la reducción en el origen y la reutilización de este residuo, por ejemplo, en el sector agrario para el acondicionamiento del suelo, debido a la gran cantidad de nutrientes y materia orgánica que los lodos pueden aportar. El uso de este biosólido en suelos agrícolas generalmente mejora las propiedades del suelo, como por ejemplo la fertilidad, lo cual provoca una mejora en el rendimiento del cultivo.

La producción de lodos en Canarias es alta y según fuentes oficiales se incrementará en los próximos años, además en islas como Tenerife donde el destino final de los lodos es el vertido se hace necesario la implantación de sistemas de reutilización. En este Trabajo Fin de Grado se evalúa la calidad agronómica de los lodos, así como los principales tratamientos que permiten adecuar el fango para su reutilización. Además, tomando como modelo la EDAR de Valle de Guerra se plantea la viabilidad para optimizar la línea actual de tratamiento de fangos.

La línea de tratamiento plantada para la mejora de las características del lodo producto de la estación depuradora del noreste de Tenerife consiste en la implementación de un sistema de estabilización anaerobio y un proceso de deshidratación solar. El primero con el objetivo de reducir el contenido en organismos patógenos del lodo y el segundo con el fin de elevar el porcentaje de sequedad del lodo para su correcto uso y transporte. Además, la instalación se complementa con un sistema de aprovechamiento del biogás, producido en la digestión anaerobia, para la producción eléctrica.

La producción actual de lodos de la EDAR se estima en 33.816 kg/d los cuales nos son reutilizados. Atendiendo al espacio disponible se propone la instalación de un digestor anaerobio que permite una reducción de 2.624 kg/d de fangos y la producción eléctrica de 7.708 MWh al año mediante el sistema de aprovechamiento del biogás. El sistema de secado solar permite obtener un biosólido que cumple con los requerimientos legales para su reutilización con una sequedad de en torno al 60%. El sistema permite reducir la huella de carbono de la EDAR en 49.614 kgCO<sub>2</sub>/año por transporte y un ahorro en la huella de carbono de 1.170 tCO<sub>2</sub>/año gracias a la cogeneración, reduciendo la cantidad de lodo vertido a 6.721 kg/d.

## Abstract

The production of sludge is inherent to wastewater treatment and, being a hazardous waste, it must be treated. According to the current regulations in Spain, the ideal management is the reduction at source and the reuse of this waste, for example, in the agricultural sector for soil conditioning, due to the large amount of nutrients and organic matter that sludge can provide. The use of this biosolid in agricultural soils generally improves soil properties, such as fertility, which leads to improved crop yields.

Sludge production in the Canary Islands is increasing and, according to official sources, it will increase in the coming years. Moreover, on islands such as Tenerife, where the final destination of sludge is landfill, it is necessary to implement reuse systems. In this Final Degree Project the agronomic quality of the sludge is evaluated, as well as the main treatments that allow to adapt the sludge for its reuse. In addition, taking the Valle de Guerra WWTP as a model, the feasibility of optimizing the current sludge treatment line is proposed.

The treatment line designed to improve the characteristics of the sludge from the northeast wastewater treatment plant of Tenerife consists of the implementation of an anaerobic stabilization system and a solar dehydration process. The former is aimed at reducing the pathogenic organism content of the sludge and the latter to increase the percentage of dryness of the sludge for its correct use and transport. In addition, the facility is complemented by a system for using the biogas produced in the anaerobic digestion process for electricity production.

The current production of sludge from the WWTP is estimated at 33,816 kg/d, which is not reused. Taking into account the available space, it is proposed to install an anaerobic digester that allows a reduction of 2,624 kg/d of sludge and the production of 7,708 MWh of electricity per year by means of the biogas utilization system. The solar drying system allows obtaining a biosolid that meets the legal requirements for reuse with a dryness of around 60%. The system reduces the WWTP's carbon footprint by 49,614 kgCO<sub>2</sub>/year per transport and a carbon footprint saving of 1,170 tCO<sub>2</sub>/year thanks to cogeneration, reducing the amount of sludge discharged to 6,721 kg/d.

# 1. Producción y caracterización de lodos procedentes de una depuradora de aguas residuales

## 1.1. Definición de lodos

El artículo 1 del Real Decreto 1310/1990, de 29 de octubre, por el que se regula la utilización de los lodos de depuración en el sector agrario, define a los lodos de depuración como “*Los lodos residuales salidos de todo tipo de estaciones depuradoras de aguas residuales domésticas, urbanas o de aguas residuales de composición similar a las anteriormente citadas, así como los procedentes de fosas sépticas y de otras instalaciones de depuración similares utilizadas para el tratamiento de aguas residuales*”. Por tanto, se trata de los residuos obtenidos de cualquier proceso de depuración y/o regeneración de aguas residuales independientemente de cual sea su origen.

Los lodos se caracterizan por ser un residuo extremadamente líquido (más de un 95% de agua). Su composición es variable y depende de la carga de contaminación del agua residual inicial y de los tratamientos llevados a cabo en el proceso de depuración y/o regeneración de aguas residuales. Los tratamientos a los que se somete el agua residual concentran los constituyentes contaminantes presente en el agua, y por tanto, los lodos contienen amplia diversidad de materias suspendidas o disueltas. Algunas de ellas con alto valor agronómico como: materia orgánica, nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) y en menor cantidad calcio (Ca), magnesio (Mg) y otros micronutrientes esenciales para las plantas, y otras sustancias con elevado potencial contaminante como son: los metales pesados, entre ellos cadmio (Cd), cromo (Cr), cobre (Cu), mercurio (Hg), níquel (Ni), plomo (Pb) y zinc (Zn), los patógenos, y los contaminantes orgánicos (MARM, 2009). La siguiente figura muestra la proporción de constituyentes de un fango tipo de una depuradora de aguas residuales doméstica.

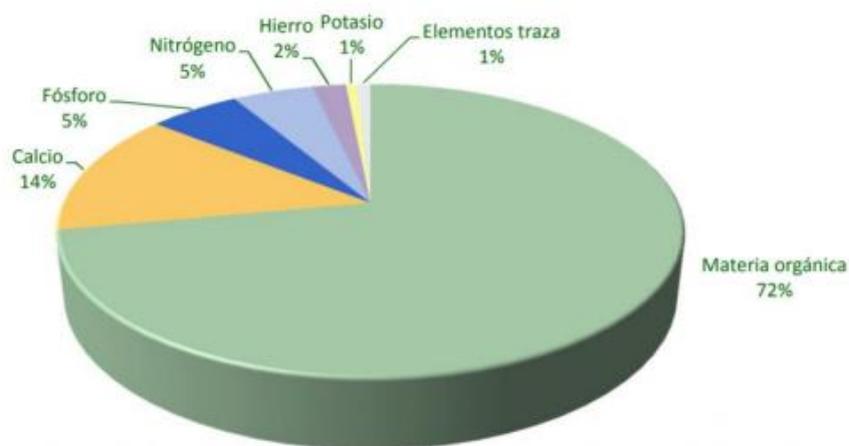


Figura 1 Composición de la materia seca de los lodos, 2019 (Fuente Aldavero)

## 1.2. Clasificación de los lodos

Los lodos procedentes del tratamiento del agua residual se pueden clasificar atendiendo a diferentes criterios. A continuación se describen los principales criterios de clasificación.

- Dependiendo del origen del agua residual a tratar:
  - Lodos urbanos: Son aquellos que generados por aguas domésticas y de empresas de pequeño y mediano tamaño ubicadas dentro de los cascos urbanos.
  - Lodos industriales: Son los lodos generados en estaciones de tratamiento de vertidos de procedencia industrial.

Las características químicas entre estos dos tipos de lodos son considerablemente diferentes, siendo los lodos industriales más ricos en metales pesados y contaminantes orgánicos que los urbanos. La presencia de metales pesados condiciona notablemente su reutilización.

- En función de la etapa de depuración de las aguas residuales se pueden obtener:
  - Lodos primarios: Son los obtenidos por la acción de la gravedad en un decantador primario mediante la sedimentación de sólidos concentrados en el fondo del tanque.

La cantidad de lodos producidos es función del caudal del afluente, de la cantidad de sólidos suspendidos contenidos en dicho afluente y de la eficiencia del sistema de decantación (la cual suele rondar en torno al 65%). Estos presentan alta variabilidad dependiendo del origen y son susceptibles de presentar una mayor contaminación de origen antropogénico (González, 2015).

- Lodos secundarios o biológicos: Los lodos procedentes de los tratamientos secundarios son consecuencia de procesos biológicos para la degradación de materia carbonosa y/o eliminación de nutrientes. Este tipo de fangos se componen principalmente de materia orgánica parcialmente estabilizada.

La cantidad y características de estos lodos varían en función del metabolismo y el grado de crecimiento de los diferentes tipos de microorganismos presentes en los mismos lodos, de la temperatura y del grado de estabilización que se produzca.

- Lodos mixtos: Estos son una mezcla entre los lodos primarios y secundarios, los cuales son tratados habitualmente en la línea de fangos. Pero en ocasiones, estos lodos primarios y secundarios se tratan por separado (González, 2015).

- Lodos terciarios o físico-químicos: Son lodos resultantes de la adición de sales de hierro o aluminio y cal al agua residual con el fin de mejorar el rendimiento en la eliminación de materia orgánica suspendida, eliminar determinados compuestos inorgánicos disueltos en el agua o para la eliminación de fósforo. Estos lodos sólo se obtienen en las estaciones depuradoras que presentan tratamientos físico-químicos (Pérez, 2016).

Las características de estos lodos son afectadas por las propiedades químicas del agua a tratar como: el pH, la mezcla con el reactivo adicionado, el tiempo de reacción y la capacidad de la floculación que presente el sistema (González, 2015).

En la siguiente figura, se puede observar de una forma gráfica, de donde se originan los diferentes tipos de lodos en función al tratamiento que han recibido.

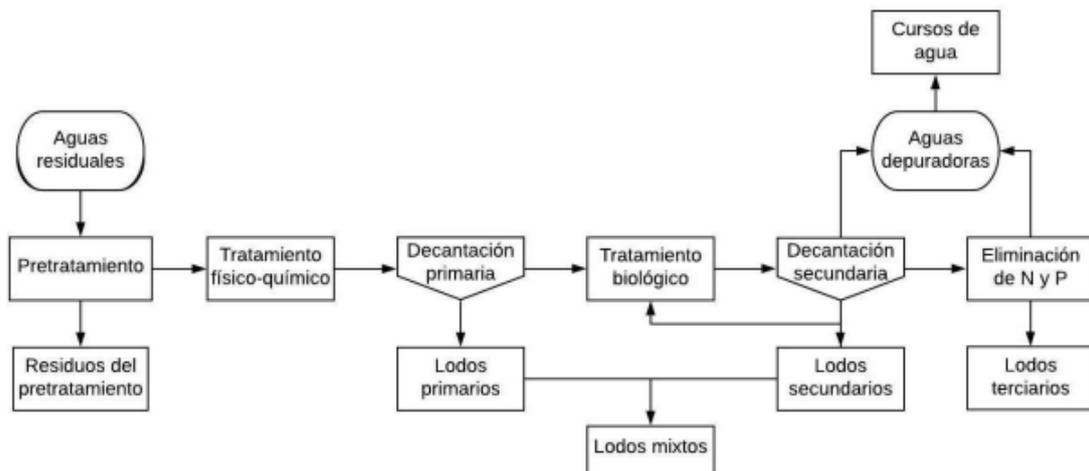


Figura 2 Origen de los lodos en función del tratamiento que recibe para un influente de procedencia urbana, 2019 (fuente Aldavero)

Como se puede observar en la siguiente tabla, los lodos primarios (LDP) son ricos en compuestos orgánicos si los comparamos con los lodos secundarios (LDS), llegando estos a presentar porcentajes (en sólidos totales ST) entre 60 y 80% mientras que los LDS entre 50 a 60%. La diferencia de proporción se debe al origen del fango puesto que los secundarios son el subproducto de procesos biológicos donde ha tenido lugar un proceso de degradación de la materia orgánica, tal y como ya se ha mencionado anteriormente.

Destacar que los lodos primarios presentan más cantidad de sólidos totales que los lodos secundarios, presentando los LDP porcentajes entre 3 y 7% mientras que los LDS constan de entre un 0,5 y 2%. Como los lodos primarios son consecuencia de la decantación por gravedad de los sólidos adyacentes del agua residual es normal que este parámetro sea mayor en LDP que en los LDS.

Parámetro	Lodo Primario	Lodo Secundario
Sólidos Totales (ST) (%)	3-7	0,5-2
Materia Orgánica (%ST)	60-80	50-60
Nitrógeno (%ST)	1,5-4	2,4-5
Fósforo (%ST)	0,8-2,8	0,5-0,7
Potasio (%)	0-1	0,5-0,7
pH	5-8	6,5-8

Tabla 1 Características del lodo primario y secundario, 2013 (fuente ITC)

## 2. Reutilización de los lodos

De forma posterior al tratamiento de las aguas residuales, los lodos generados a partir de estas deben tener un destino tomando como principio el de la jerarquía de residuos que se estipula en la Ley 7/2022, de 8 de abril, de residuos y suelos contaminados para una economía circular, que tiene como finalidad *“la prevención y la reducción de la generación de residuos y de los impactos adversos de su generación y gestión, la reducción del impacto global del uso de los recursos y la mejora de la eficiencia de dicho uso con el objeto de, en última instancia, proteger el medio ambiente y la salud humana y efectuar la transición a una economía circular y baja en carbono con modelos empresariales, productos y materiales innovadores y sostenibles para garantizar el funcionamiento eficiente del mercado interior y la competitividad de España a largo plazo”*.

Esta jerarquía tiene como objeto generar el menor impacto posible tanto sobre el medio ambiente como en la salud humana y reducir el uso de recursos. Los principales usos que se le pueden dar a los lodos producidos en las EDARs son: el uso sobre suelo agrícola (siendo este empleado directamente o después de compostar), el uso del lodo como valorización energética (generando biogás por medio de una digestión anaerobia o produciendo electricidad por medio de incineración entre otros métodos) y por último la eliminación de estos en vertederos controlados. En la siguiente figura se puede observar la jerarquía que seguirán los distintos usos de los lodos y algunos de los métodos que se pueden utilizar para cada uno de ellos.



Figura 3 Principio de jerarquía en la gestión de los lodos de depuradora, 2016 (fuente Pérez)

Ante la creciente producción de lodos que proceden de depuradores de aguas residuales, tanto urbanas como industriales, es de suma importancia el hecho de reutilizar toda esta cantidad de materia orgánica que puede servir de forma fertilizante en la actividad agraria. Este método de reutilización es el más adecuado para su progresiva eliminación debido a que es beneficioso de forma ambiental como para el ámbito agrario porque permite eliminar estos residuos sin alterar el equilibrio ecológico.

Pero se debe tener en cuenta que los lodos generados del tratamiento de depuración pueden contener gérmenes y parásitos peligrosos para los humanos. De esto, la importancia de tratar los lodos de forma adecuada y de que exista una directiva, tanto a nivel nacional como europea, para la regulación de la reutilización de estos residuos.

## 2.1. Producción de lodos en España

Atendiendo a los datos del Registro Nacional de Lodos, en España se producen de forma anual alrededor de  $1,2 \times 10^6$  toneladas (en materia seca) de lodos de depuradora (MARM, 2009). Estos datos son corroborados por el Instituto Nacional de Estadística en el que se puede observar, mediante la siguiente gráfica, la evolución de esta producción comentada con anterioridad a través de los años.

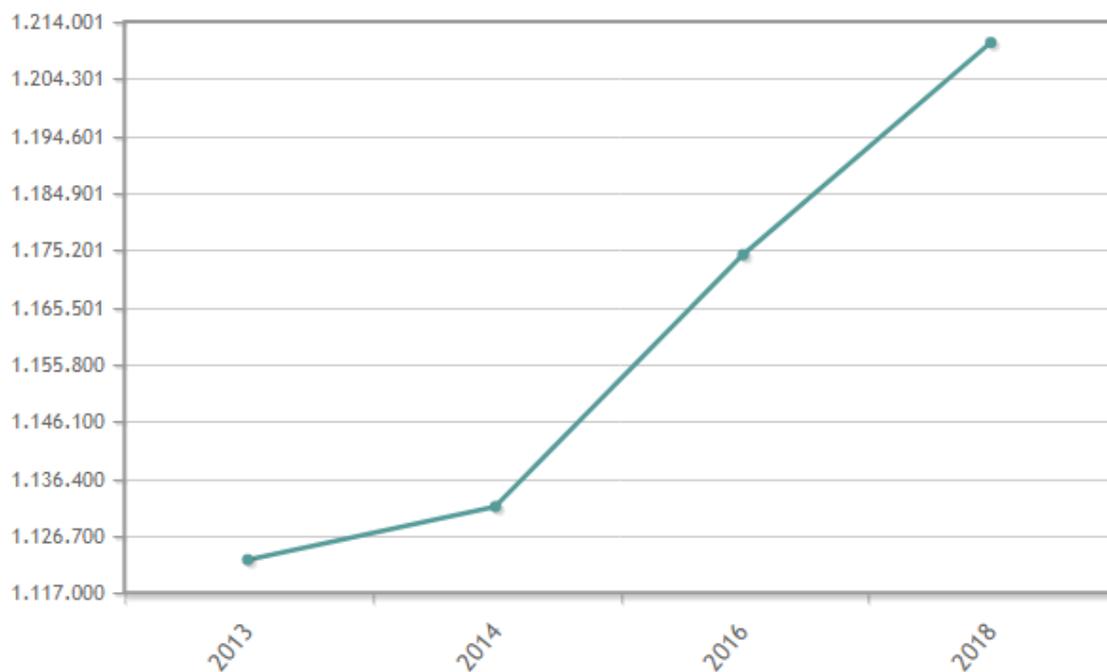


Figura 4 Producción de lodos en España, 2013-2018 (fuente INE)

En la figura 4, se puede observar que con el paso de los años la producción de lodos en España ha ido en incremento. Se puede prever que si esta tendencia sigue al alza, en España se llegará a producir una cantidad de alrededor a  $1,3 \times 10^6$  toneladas de materia seca para 2030. Teniendo estos datos en mente, es de suma importancia el uso que se le dan a estos residuos para minimizar sus vertidos ya que cada año su producción aumenta.

Según el Instituto Nacional de Estadística, en 2018, el destino de los lodos de depuradora al ámbito de la reutilización de estos en la agricultura, silvicultura y jardinería es del 87% en España. Dejando el 5,5% del uso final de los lodos al aprovechamiento energético o la incineración y el resto (7,5%) a vertederos. Estos datos sitúan a España como uno de los países europeos que menos lodos destina a vertederos y más a uso agrícola.

España	2018	2016	2014	2013
Agricultura, silvicultura y jardinería	87	80,2	79,7	77,4
Incineración o aprovechamiento energético	5,5	9,5	9	10,8
Vertedero	7,5	10,3	11,3	11,8

Tabla 2 Destino de Lodos en España, 2013-2018 (fuente INE)

Se puede observar en la tabla 2 como el uso de los lodos de depuradora en la agricultura, silvicultura y jardinería han ido aumentando porcentualmente con respecto a los años anteriores (2013, 2014 y 2016). Disminuyendo casi por igual el uso de estos en incineración y en vertidos.

Los porcentajes de destino varían en función de la comunidad autónoma, pero en la mayoría de éstas se prioriza el destino de los lodos de depuradora al sector agrario variando en cada una de las comunidades autónomas el pretratamiento que estos reciben antes de su vertido.

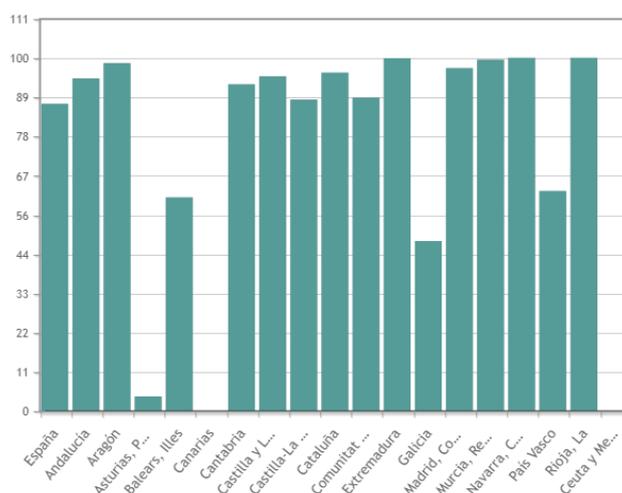


Figura 5 Lodos destinados a sector agrario, 2018 (fuente INE)

En comunidades autónomas como Extremadura, Murcia, Navarra y Rioja se destina el 100%, o casi el 100%, de los lodos a la agricultura. Mientras que en comunidades como Asturias, Galicia dedican menos del 50% a este sector. Como se puede observar en la figura 5, tanto Canarias como Ceuta y Melilla no tienen planteado la reutilización del fango en el sector agrícola.

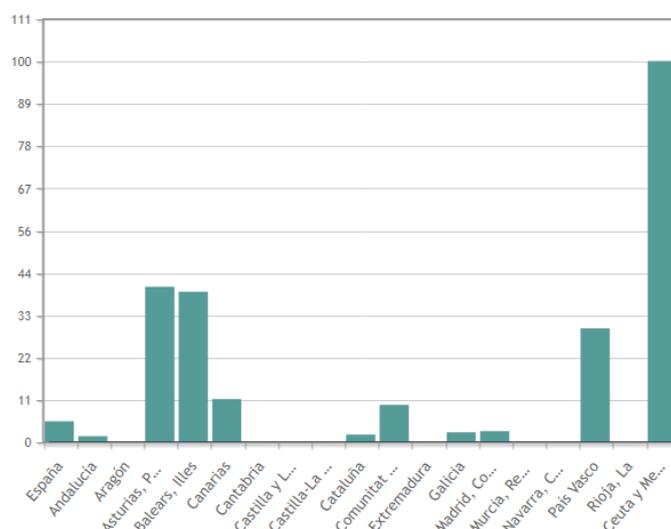


Figura 6 Lodos destinados a incineración o valorización energética, 2018 (fuente INE)

Como se puede observar en la figura 6, Ceuta y Melilla dedican todos sus residuos procedentes de depuradoras a la valorización energética o incineración.

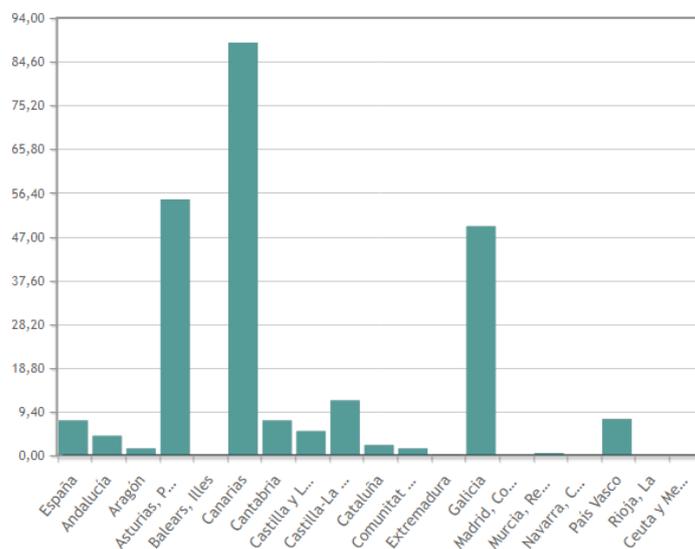


Figura 7 Lodos destinados a vertidos, 2018 (fuente INE)

En el caso de Canarias, como se aprecia en la figura 7, se dedica básicamente todos los lodos producidos en depuradora a su vertido, siendo seguida por Asturias y Galicia. El caso de Canarias es preocupante puesto que se trata de una región que centra su economía en el sector turístico, el cual demanda muchos recursos naturales y eleva la producción de residuos. El vertido de los lodos de depuradora en una zona con limitación territorial como es el caso de Canarias es el peor de los destinos para un residuo, que además, puede ser reutilizado o valorizado energéticamente.

Como se menciona en el diagnóstico de lodos en Canarias realizado por el Instituto Tecnológico de Canarias (ITC), el problema con los lodos procedentes de depuradoras en Canarias es debido a la gestión y tratamientos que se le da a los mismos. Una solución a este problema podría ser tratamientos más sofisticados con el fin de darles una calidad adecuada a los lodos y plantear su gestión para darle una finalidad útil a los subproductos generados de estos tratamientos.

## 2.2. Reutilización del fango como fertilizante

Como ya se ha comentado anteriormente, el método de reutilización más adecuado para los lodos de estaciones depuradoras es el fertilizante por su naturaleza rica en materia orgánica, nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio, así como otros micronutrientes esenciales, lo cual hace a estos residuos idóneos para esta labor.

No obstante, los lodos deben pasar por un proceso de deshidratación y tratamiento para poder ser usados como fertilizantes en la industria agrícola. La deshidratación se lleva a cabo debido a la gran carga de humedad que estos presentan (por encima del 90%) y en el tratamiento se debe asegurar que los fangos estén libres de contaminantes orgánicos e inorgánicos o microorganismos patógenos (como virus, bacterias y hongos, entre otros) que puedan alterar la naturaleza del suelo y afectar a la cadena alimentaria.

### 2.2.1. Propiedades del suelo

Las propiedades del suelo pueden condicionar la utilización de los lodos procedentes de una estación de tratamiento de aguas residuales. En este apartado se describen de manera breve las principales características de los suelos. Las propiedades del suelo se dividen en tres. Siendo estas físicas, químicas y biológicas.

- Propiedades físicas: las propiedades físicas de un suelo, determinan la rigidez y la fuerza de sostenimiento, la facilidad para la penetración de las raíces, la aireación, la capacidad de drenaje y de almacenamiento de agua, la plasticidad y la retención de nutrientes. Dentro de estas propiedades físicas se encuentran otra serie de características como son la textura, la porosidad y la estructura (Rucks y col., 2004).
  - La textura representa el porcentaje en que se encuentran los elementos que constituyen el suelo, como pueden ser la arena gruesa, media y fina, entre otros. Se interpreta que un suelo presenta una textura adecuada cuando la proporción de estos elementos dan la posibilidad de ser un soporte capaz de favorecer el crecimiento de las raíces de las plantas (Rucks y col., 2004).
  - La estructura se la define como la distribución de las partículas que conforman el suelo. Estas partículas no están sólo referidas a las fracciones granulométricas mencionadas en la textura, sino que también se le incluyen los elementos que se forman por la agregación de las fracciones granulométricas (Rucks y col., 2004).
  - La porosidad es el sistema de espacios no ocupados por sólidos (poros) del suelo. Dentro del mismo espacio poroso se pueden distinguir macroporos y microporos. Los primeros siendo responsables del drenaje y aireación del suelo, siendo también el lugar donde se desarrollan las raíces. Y los segundos son los encargados de retener el agua, parte de la cual se dispone a las plantas. Esta característica (porosidad) es función de la textura y estructura del suelo (Rucks y col., 2004).

- **Propiedades químicas:** El suelo está constituido por componentes sólidos, líquidos y gaseosos. Los componentes sólidos del suelo son de carácter orgánico (estos suelen ser origen de restos de animales y plantas) e inorgánico, los cuales se encuentran en diversos estados de descomposición y desintegración. A su vez, en esta fase se determinará la disponibilidad de muchos nutrientes y contaminantes. La fase líquida está constituida por una solución acuosa de solutos orgánicos e inorgánicos cuya composición es sumamente relevante para que diversos microorganismos puedan desarrollar su actividad biológica. La fase gaseosa está formada por diversos gases como son: nitrógeno, oxígeno, dióxido de carbono y metano, entre otros. Estos se encuentran en espacios donde no existe agua y por eso la cantidad de gases en el suelo es inversamente proporcional a la cantidad de agua presente (Gondim-Porto, 2013). Algunas características químicas relevantes, por el hecho de aportar información sobre las propiedades químicas en sí son el intercambio catiónico, el pH y la salinidad.
  - **Intercambio catiónico:** Es una medida de cantidad en cuanto a cargas negativas presentes en las superficies de minerales y componentes orgánicos del suelo. Representa la cantidad de cationes que las superficies pueden retener (Ca, Mg, Na, K, NH<sub>4</sub>, etc.). El nivel de intercambio catiónico indica la habilidad de los suelos a la hora de retener cationes, disponibilidad y cantidad de nutrientes destinados a la planta, entre otras (FAO).
  - **pH:** Determina el grado de adsorción de iones (H<sup>+</sup>) por partículas de suelo e indica si este es ácido o alcalino. Esta medida se usa como indicador principal en la disponibilidad de nutrientes destinado a las plantas, influyendo en características como la solubilidad, movilidad, disponibilidad y de otros constituyentes y contaminantes inorgánicos presente en el suelo. El rango de valores de pH que puede presentar un suelo, oscilan entre 3,5 (muy ácido) a 9,5 (muy alcalino). Los suelos muy ácidos tienden a presentar características tóxicas mientras que los suelos muy alcalinos tienden a dispersarse (FAO).
  - **Salinidad:** Acumulación de sales solubles en agua presentes en el suelo (cloruros, sulfatos, nitratos, carbonatos, bicarbonatos., etc.) (Pérez, 2016).
- **Propiedades biológicas:** Aparte de las raíces de las plantas, el suelo está conformado por una amplia serie de organismos vivos entre los cuales se encuentran los hongos, bacterias, levaduras, actinomicetos, nematodos, arqueas, algas, protozoos, insectos, lombrices, etc. La actividad biológica que presentan esta serie de organismos, tiene efectos directos sobre las propiedades físicas y químicas del suelo, ayudando a mejorar sus características y favoreciendo la descomposición y mineralización de la materia orgánica, aparte de aportar materia orgánica a su vez y favoreciendo la aireación de los suelos (Pérez, 2016).

### 2.2.2. Efectos de los lodos de depuradora en el suelo

Una vez analizadas las propiedades que presentan los suelos, se da paso a contemplar cómo afecta la aplicación de lodos de depuradora en los suelos. A modo de resumen gráfico, en la siguiente figura se pueden observar los distintos efectos que se pueden producir en las propiedades del suelo tras la adición de fangos.



Figura 8 Cambios producidos en el suelo tras la adición de lodos de depuradora, 2022 (fuente elaboración propia)

#### 2.2.2.1. Efectos en las propiedades físicas del suelo

Los lodos obtenidos de estaciones depuradoras presentan altos contenidos en materia orgánica. Es por esto que los efectos de la aplicación de dichos lodos son predominantemente físicos mientras que efectos como los químicos y nutricionales dependen de la composición, tratamiento y método de aplicación. Los efectos físicos que genera la aplicación de lodos producen un cambio en la estructura y en el sistema poroso del suelo (Cuevas y col., 2006).

La aplicación de lodos sobre suelo tiene consecuencias beneficiosas para esta, ya que dependiendo de la dosis y de la profundidad de aplicación, estos generan mejoras en la productividad, la porosidad de los suelos, la formación y estabilidad de agregados, la capacidad de retención del agua y sirve a su vez para la recuperación de suelos degradados (Pérez, 2016; Cuevas y col., 2006).

Según Cuevas y col. (2006) la aplicación de lodo fresco genera, en un corto plazo de tiempo, un aumento de la macroporosidad. Debido al aumento de esta, la densidad aparente del suelo disminuye, ya que se crean espacios dentro de la matriz de los suelos causados por el material orgánico. Esto conlleva a un aumento de los valores de porosidad total (Pérez, 2016; Cuevas y col., 2006).

Por otro lado, y como se comentó anteriormente, la aportación de lodos provenientes de estaciones depuradoras favorece el aumento de la estabilidad y formación de agregados. Estos aportes de hasta un 5% (masa seca) de lodos urbanos llegaron a generar aumentos de estabilidad de agregados de hasta un 78% respecto a la condición inicial de un suelo con 7,5 g/kg de materia orgánica. Asegurándose así un potencial de protección del suelo ante la erosión (Cueva y col., 2006; Guerrero y col., 2001). Una mayor estabilidad conlleva un aumento del diámetro de los agregados, favoreciendo el paso del agua y del aire (Cuevas y col., 2006).

Sin embargo, también existen estudios en los que se observan efectos adversos en las propiedades físicas del suelo. Añadir una cantidad excesiva de materia orgánica en suelos o que los suelos presenten un gran contenido en materia orgánica, puede producir efectos como la hidrofobia provocando la disminución de infiltración (restringiendo la entrada de agua al suelo) y un aumento de la escorrentía superficial (Macedo y col., 2002).

#### *2.2.2.2. Efectos en las propiedades químicas del suelo*

Tras la aplicación de lodos de depuradora en los suelos, propiedades químicas comentadas con anterioridad como pueden ser la capacidad de intercambio catiónico y el pH, varían.

En cuanto a la capacidad de intercambio catiónico, la adición en los suelos de lodos de depuradora genera un aumento de este parámetro (Pérez, 2016). De acuerdo con Soon (1981), los índices de aplicación relativamente altos, aumentan la capacidad de intercambio catiónico. Esto ayuda a retener nutrientes esenciales para las plantas.

Destacar que la capacidad de intercambio catiónico está correlacionado con el grado de humificación de la materia orgánica en el suelo. Este parámetro aumenta a medida que la humedad de la materia orgánica progresa. Es por esto que los lodos de depuradora compostados tienden a tener un mayor intercambio catiónico que los lodos no compostados (Vico y col, 2015).

En lo referente al pH de los suelos, generalmente este parámetro no sufre de grandes cambios tras la adición de lodos de depuradora. Las cantidades de lodos que se adicionan al suelo no son tan grandes como para apreciar un cambio significativo en el pH del suelo (Pérez, 2016; Murcia, 2014). Los cambios en los valores de este parámetro depende del propio pH de los lodos y de las sustancias presentes en estos, así como la capacidad de amortiguación de pH del suelo (la cual, como indica su nombre es la capacidad del suelo que tiene para amortiguar la cantidad de ácido o base que una solución puede absorber antes de que su pH comience a cambiar significativamente).

La capacidad de amortiguación varía en función del tipo de suelo, siendo de más a menos: suelos húmicos, suelos arcillosos, suelos francos y suelos arenosos. Esta capacidad es directamente proporcional al contenido en arcillas y materia orgánica del suelo (Pérez, 2016).

Cuando se le añaden al suelo lodos de depuradora con un pH que difiere de estos, pueden ocurrir los siguientes casos (Pérez, 2016):

- pH básico: Los óxidos de calcio, magnesio y potasio, junto con los carbonatos actúan como agentes amortiguadores.
- pH ácido: Los óxidos de aluminio e hidróxidos de hierro amortiguan los cambios de pH.
- pH neutro: el pH es amortiguado por la materia orgánica propia del suelo, las reacciones naturales de los minerales producidas por el clima y las reacciones de intercambio.

Según MARM (2009), después de realizar un análisis de lodos de distintas EDARs de toda España, los valores de pH de estos oscilan entre 5,5 y 12. Además el 50% de los lodos dieron resultados cercanos a ser neutros. Dado que los suelos pueden llegar a presentar valores desde ácidos a fuertemente alcalinos. La aplicación de los lodos puede tener un efecto amortiguador sobre el pH del suelo.

Para la aplicación de lodos en suelos es de suma relevancia tener en cuenta la composición del lodo, estudiar el suelo al que se le va a aplicar y el tipo de cultivo presente en éste. El pH del suelo determina la actividad y presencia de microorganismos, la disponibilidad de nutrientes y contaminantes y el desarrollo de los cultivos (Pérez, 2016).

En cuanto al parámetro de conductividad eléctrica, los lodos, son propensos a presentar una gran variedad de concentraciones de sales solubles y este parámetro es medido por la propia conductividad eléctrica. La concentración de sales es función del origen de los lodos y de su acumulación. El parámetro de concentración de sales en suelos es de suma relevancia debido a que dependiendo de su valor el suelo puede presentar problemas de degradación y salinidad (Pérez, 2016).

Si se atiende al estudio realizado por Beltrán y col. (2005) en el que se observaron los cambios en la conductividad eléctrica al añadir dosis controladas de lodos de depuradora en 2 suelos de cultivos de olivares en España y comparándolos a suelos iguales no tratados. Se llegó a la conclusión de que el implemento de los lodos en suelos provoca una mayor salinidad de forma anual con respecto al suelo de referencia (suelo no tratado).

Por otro lado, según Díaz y col. (2010), se observó que existen diferentes tipos de lodos que muestran resultados positivos con respecto a la permeabilidad de los suelos y se recomienda su uso en suelo con problemas de acumulación de sales con elevado contenido en sodio (Sodicidad).

Por lo que se entiende que el uso de lodos de depuradora, dependiendo del tipo de este, puede llegar a incrementar o disminuir el contenido en sales. Ya que como se mencionó anteriormente, los lodos son muy variables en cuanto a las sales que estos presentan.

Atendiendo a la fertilidad que los lodos de depuradora generan sobre el suelo, se relaciona este parámetro con el contenido en materia orgánica. Entendiendo que un aumento de la materia orgánica es sinónimo de un aumento en la fertilidad del suelo. La materia orgánica mejora las propiedades físicas e hídricas de los suelos y al descomponerse ésta, libera nutrientes esenciales para las plantas.

Al incorporar lodos sobre los suelos, estos aportan una gran cantidad de nutrientes al mismo (macro y micronutrientes). A consecuencia de la aportación de materia orgánica, nutrientes y más elementos, el pH y la actividad microbiológica se puede ver afectada (Pérez, 2016).

### *2.2.2.3. Efectos en las propiedades microbiológicas del suelo*

Las poblaciones microbianas del suelo están conformadas por una amplia serie de organismos vivientes como ya se ha mencionado. Cuando se le aplica al suelo un lodo, éste puede estar sujeto a cambios microbiológicos relacionados con cambios químicos producidos en el mismo más que con la introducción de microorganismo desde el lodo (Lloret y col., 2016).

La adición de lodos al suelo favorece el desarrollo de los propios microorganismos adyacentes en el suelo debido a que los lodos aportan materia orgánica la cual favorece las propiedades físicas del suelo. Cuando aumenta el número de microorganismos se produce un aumento en la presencia de enzimas y metabolitos, enzimas que intervienen en las reacciones de mineralización e inmovilización de nutrientes, lo cual es un factor relacionado con la disponibilidad de nutrientes para la vegetación. Los metabolitos liberados por los microorganismos favorecen el crecimiento de la vegetación (Gondim-Porto, 2013).

A su vez, existen componentes tóxicos en los propios componentes orgánicos y metales pesados que hay en los lodos. Estos tóxicos pueden llegar a alterar la población de microorganismos en el suelo, disminuyendo la presencia de estos y su actividad. Los metales pesados alteran la biodisponibilidad del suelo dependiendo de las características de estos, como la cantidad de materia orgánica, la capacidad de intercambio catiónico y el pH (Murcia, 2014).

Dependiendo del tratamiento utilizado en los lodos y de otros factores como el grado de higienización del lodo y la dosificación utilizada en los suelos, se pueden añadir patógenos al suelo. Los cuales presentan un riesgo si su presencia es la suficiente como para poder tener contacto con animales o plantas (Gondim-Porto, 2013).

## *2.3. Normativa de aplicación para su reutilización*

Al ser, el suelo agrícola, un recurso inestimable y limitado cuya degradación supone tanto destruir un bien muy preciado como el de minar las oportunidades de su uso para generaciones futuras, la protección de este es un objetivo prioritario y por eso se establecen normativas en cuanto al uso de determinados abonos como los lodos de depuradora con el fin de garantizar su fertilidad y valor agronómico, presente y futuro.

Debido a las repercusiones que pueden tener el uso de productos fertilizantes en la salud y seguridad tanto de las personas como del medio ambiente, se procede a la regulación de la utilización de estos, de modo que se eviten los posibles efectos negativos en el agua, suelo, flora, fauna y en el propio ser humano.

### 2.3.1. Normativa europea para la reutilización del fango como fertilizante

La normativa europea por la cual se acredita el uso de lodos de depuradora para la obtención de productos fertilizantes obtenidos por compostaje es el REGLAMENTO (UE) 2019/1009, 5 de junio.

En este, se especifican los valores mínimos en micronutrientes que deben tener los fertilizantes orgánicos para diferentes usos, como el hortícola o uso en cultivos. También viene especificado el límite superior de microorganismos, del cual no deben pasar estos fertilizantes para que se permita su uso, estos límites vienen detallados con sus respectivos planes de muestreo en las siguientes tablas.

Microorganismos sometidos a ensayo	Planes de muestreo			Limite
	n	c	m	M
Salmonela spp	5	0	0	Ausencia en 25 g o 25 ml
E. coli	5	5	0	1.000 en 1 g o 1 ml

n = Número de muestras del ensayo

c = Número de muestras en las que el número de bacterias expresado en unidades formadoras de colonias (ufc) se sitúe entre m y M

m = Valor umbral de número de bacterias expresado en ufc considerado como satisfactorio

M = Valor máximo del número de bacterias expresado en ufc

*Tabla 3 Valores límite de microorganismos en fertilizantes orgánicos, 2019 (fuente BOE)*

Micronutriente	Contenido de micronutrientes (% en masa)		
	Abono órgano-mineral sólido		Abono órgano-mineral líquido
	Uso en cultivos	Uso hortícola	
Boro (B)	0,01	0,01	0,01
Cobalto (Co)	0,002	n. a.	0,002
Hierro (Fe)	0,5	0,02	0,02
Manganeso (Mn)	0,1	0,01	0,01
Molibdeno (Mo)	0,001	0,001	0,001
Cobre (Cu)	0,01	0,002	0,002
Zinc (Zn)	0,01	0,002	0,002

*Tabla 4 Valores mínimos de micronutrientes en fertilizante orgánicos, 2019 (fuente BOE)*

### 2.3.2. Normativa española para la reutilización de los fangos

En el marco normativo nacional, las normativas que regulan la calidad para la reutilización de fangos como fertilizante en la actualidad son:

- Real Decreto 1310/1990, de 29 de octubre, por el que se regula la utilización de los lodos de depuración en el sector agrario.
- Real Decreto 506/2013, de 28 de junio, sobre productos fertilizantes.
- Real Decreto 865/2010, de 2 de julio, sobre sustratos de cultivo.
- Orden AAA/1072/2013, de 7 de junio, sobre utilización de lodos de depuración en el sector agrario.

#### 2.3.2.1. Real Decreto 1310/1990, de 29 de octubre

En el Real Decreto sobre el uso de lodos de depuradora en el sector agrario, se establecen los límites para la concentración en metales pesados en los lodos (indicadas en el Anexo I B) y también los límites en suelos que deben tener una concentración menor a las recogidas en el Anexo I A para permitirse la aplicación de lodos en el sector agrícola. En el Anexo I C se detalla cuál ha de ser la dosificación anual de lodos en relación al contenido en metales pesados.

En este Real Decreto, también se recoge la normativa de cómo se han de realizar las analíticas pertinentes a los lodos y suelos.

En las tablas mostradas a continuación, se observan los Anexos del Real Decreto 1310/1990 a los que se hicieron mención con anterioridad.

Parámetros	Valores límite	
	Suelos con pH menos de 7	Suelos con pH mayor de 7
Cadmio	20	40
Cobre	1.000	1.750
Níquel	300	400
Plomo	750	1.200
Zinc	2.500	4.000
Mercurio	16	25
Cromo	1.000	1.500

*Tabla 5 Valores límite de concentraciones de metales pesados en lodos destinados a uso agrario en mg/kg de materia seca, 1990 (fuente BOE)*

Parámetros	Valores límite	
	Suelos con pH menos de 7	Suelos con pH mayor de 7
Cadmio	1	3
Cobre	50	210
Níquel	30	112
Plomo	50	300
Zinc	150	450
Mercurio	1	1,5
Cromo	100	150

*Tabla 6 Valores límite de concentraciones de metales pesados en suelos en mg/kg de materia seca, 1990 (fuente BOE)*

Parámetros	Valores límite
Cadmio	0,15
Cobre	12
Níquel	3
Plomo	15
Zinc	30
Mercurio	0,1
Cromo	3

*Tabla 7 Valores límites para las cantidades anuales de metales pesados basados en media de diez años en kg/Ha/año, 1990 (fuente BOE)*

#### 2.3.2.2. Real Decreto 506/2013, de 28 de junio

En el Real decreto sobre productos fertilizantes se especifican las características que deben cumplir los fertilizantes para su uso en la agricultura. Esta norma jurídica no se centra en concreto en los lodos de depuradora, sino a distintos tipos de fertilizante según su material de origen, entre los cuales están los lodos de depuradora, que se encuentra en el Grupo 6 “Enmiendas orgánicas” del Anexo I en el punto 6.02.

Se especifica en este Real decreto el contenido en nutrientes a garantizar (Carbono, Nitrógeno orgánico, Nitrógeno amoniacal, entre otros), cuáles son los contenidos mínimos de estos, límite máximo de metales pesados (clasificando los lodos en tres categorías en función de este parámetro) y de microorganismos. Las tablas en las cuales se especifican todos estos parámetros son las mostradas a continuación:

Contenido mínimos 6.02	
Materia orgánica total (%)	35
Humedad máxima (%)	40
C/N	<20
Contenido en impurezas en inertes	0
Granulometría (90% del paso de partículas por malla)	25 mm

Tabla 8 Contenidos mínimos exigidos o declarables en fertilizantes, 2013 (fuente BOE)

Metal pesado	Límites de concentración		
	Sólidos: mg/kg de materia seca		
	Clase A	Clase B	Clase C
Cadmio	0,7	2	3
Cobre	70	300	400
Níquel	25	90	100
Plomo	45	150	200
Zinc	200	500	1.000
Mercurio	0,4	1,5	2,5
Cromo (Total)	70	250	300
Cromo (VI)	0	0	0

Tabla 9 Valores límite de concentraciones de metales pesados en distintas clases de fertilizante, 2013 (fuente BOE)

En la tabla 9, las distintas clases que vienen determinadas en función de los metales pesados. Son una clasificación directa de los lodos en base a este parámetro y tienen la función de cuantificar la calidad del lodo.

Límite máximo de microorganismos	
Microorganismo	Requisito
Salmonella	Ausente en 25 g
E. coli	< 1.000 NMP por g

Tabla 10 Valores límite de microorganismos en fertilizantes, 2013 (fuente BOE)

### 2.3.2.3. Real Decreto 865/2010, de 2 de julio

En este reglamento sobre sustratos de cultivo, se dictan las directrices o límites en el caso de utilizar el fertilizante como sustrato de cultivo (medio o material en el que crecen las plantas, hierbas o verduras cultivadas en contenedor o maceta, a modo de sustituto de la tierra). Los límites son en sí los mismos que en el Real Decreto 506/2013, de 28 de junio pero solo existiendo dos clases (Las dos más exigentes: A y B). Especificando estos en la siguiente tabla:

Sustratos de cultivo	Real Decreto 865/2010	
	Clase A	Clase B
Materia orgánica total (%)	>20	
Salmonella spp	Ausentes en 25 g producto elaborado	
Listeria monocytogenes	Ausente en 1 g materia bruta	
E. coli	<1.000 NMP/g	
Enterococcaceae	Entre 104 y 105 NMP/g producto elaborado	
Clostridium perfringens	Entre 102 y 103 NMP/g producto elaborado	
Cadmio (mg/kg)	0,7	2
Cobre (mg/kg)	70	300
Níquel (mg/kg)	25	90
Plomo (mg/kg)	45	150
Cinc (mg/kg)	200	500
Mercurio (mg/kg)	0,4	1,5
Cromo (total) (mg/kg)	70	250
Cromo (VI) (mg/kg)	0,5	0,5

Tabla 11 Valores límite de requisitos para uso de lodos como sustrato de cultivo, 2010 (fuente BOE)

Finalmente en función de las características de calidad que presente el fertilizante, este se puede destinar a distintos usos como:

- Sustrato Semillero: Medio o material que sustituye al suelo de uso para semilleros.
- Sustrato Macetas: Medio o material que sustituye al suelo de uso para macetas.
- Fertilizante Orgánico: Fertilizante de origen orgánico con una nula o poco participación del hombre para su formación.
- Enmienda (Mulch): Técnica que aprovecha los restos de poda, hierba y desechos orgánicos para generar un capa de residuos vegetales fibrosos utilizado como protección física del suelo y de las raíces.

#### 2.3.2.4. Orden AAA/1072/2013, de 7 de junio

Esta orden que trata sobre la utilización de lodos de depuración en el sector agrario tiene como objeto actualizar el contenido del Registro Nacional de Lodos y la información que deben proporcionar las instalaciones depuradoras de aguas residuales y distintas industrias de tratamiento de lodos, como por ejemplo los gestores que realizan la aplicación en las explotaciones agrícolas de lodos de depuración tratado.

Los pertinentes formularios que se le deben enviar al Registro Nacional de Lodos se encuentran en los Anexos del I al IV de la propia orden. En estos se pide información relevante a la estación depuradora donde han sido tratados los lodos, parámetros informativos del lodo (donde hay que especificar el contenido en metales pesados, micronutrientes y organismos patógenos) y por último información de aplicación de estos lodos y su información anual de estas.

#### 2.4. Calidad requerida para su reutilización

La calidad de los fertilizantes, que tienen origen en los lodos, es el requisito principal que estos deben cumplir para su uso agrícola de una forma segura. Se exige un grado de estabilidad y madurez, el cual implica una materia orgánica estable, ausente de compuestos fitotóxicos y de microorganismos patógenos (Ángeles, 2016).

Los factores que influyen directamente sobre la calidad del fertilizante o compost son las características de las materias primas (salinidad, contenido en metales pesados, etc...) y las condiciones en las que se ha desarrollado el proceso de acondicionamiento (elección de la mezcla adecuada, equilibrio entre nutrientes, humedad, aireación y porosidad).

Las magnitudes medibles que establecen la calidad de un fertilizante son:

- Calidad física: Como la granulometría, humedad y presencia de partículas extrañas.
- Calidad química: Con ensayos cuyo fin es medir el contenido y estabilidad de la materia orgánica y el contenido de nutrientes y contaminantes.
- Calidad biológica: Donde se analiza la posible presencia de organismos patógenos y semillas de malas hierbas (las cuales son semillas de una especie la cual puede llegar a desarrollarse en un entorno donde no se desea que crezca).

Los valores límites de estas magnitudes que cuantifican la calidad (física, química y biológica) vienen definidos por el marco normativo, tanto nacional como internacional. Este marco normativo corresponde a las leyes propuestas con anterioridad, las cuales serían:

- REGLAMENTO (UE) 2019/1009, 5 de junio.
- Real Decreto 1310/1990, de 29 de octubre, por el que se regula la utilización de los lodos de depuración en el sector agrario.
- Real Decreto 506/2013, de 28 de junio, sobre productos fertilizantes.
- Real Decreto 865/2010, de 2 de julio, sobre sustratos de cultivo.
- Orden AAA/1072/2013, de 7 de junio, sobre utilización de lodos de depuración en el sector agrario.

Tomando como ejemplo la planificación de la gestión de lodos de depuración de lodos de la Comunidad Valenciana, se puede observar a continuación en la siguiente figura como los lodos provenientes de las EDARs se gestionan en función del Real Decreto 1310/1990.

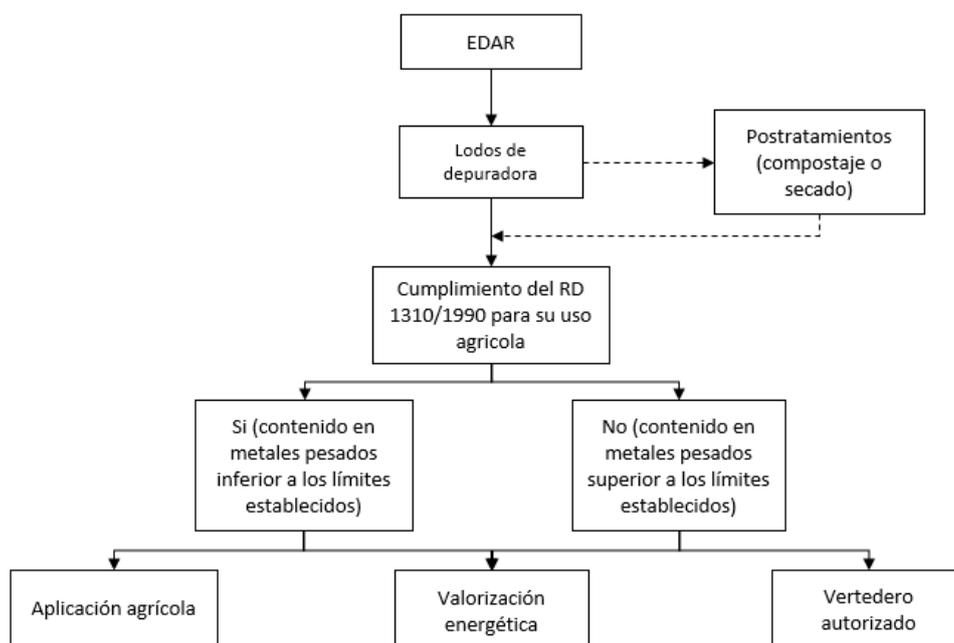


Figura 9 Planificación de gestión de lodos de la Comunidad Valenciana, 2022 (fuente elaboración propia)

Si el contenido en metales pesados es o no el establecido en los límites del correspondiente Real Decreto, el lodo puede tener un destino u otro, siendo los más óptimos el de aplicación agrícola y valorización energética. Y para el destino final de aplicación agrícola el lodo debe cumplir los límites especificados en la tabla 5.

## 2.5. Casos reales de reutilización como fertilizante

El uso de lodos de depuradora en el sector agrícola ha sido analizado ampliamente, por ejemplo, la Mancomunidad de la Comarca de Pamplona en colaboración con el Instituto Técnico y de Gestión Agrícola del Gobierno de Navarra realizó un estudio sobre el uso de fangos en cultivos ubicados en fincas de Arazuri e Ilundáin (Irañeta y col., 2013) que pretendía:

- Asegurar que el uso de lodos, desde el punto de vista agronómico, medioambiental y sanitario, es seguro a medio y largo plazo.
- Evaluar la eficiencia que presenta el uso del lodo como fertilizante con respecto a otros cultivos donde no se aplique su utilización.

El estudio se realizó mediante dos ensayos realizados cada uno en diferentes localizaciones. Uno de Lodo/Frecuencia y otro de Lodo/Nitrógeno. El primero trata de aplicar distintas dosis de lodo con diferente frecuencia de aplicación haciendo un seguimiento de la evolución de parámetros como el contenido en metales pesados que contiene el suelo y otros referentes a la fertilidad (materia orgánica, fósforo y potasio).

Los diferentes tratamientos ensayados son los que se muestran a continuación:

N° Trat	Tratamiento	Descripción	Aporte acumulado 20 años	
			Total t/ha	n° veces R
1	Dosis 1; Frecuencia 1	40 t/ha Todos los años	800	10
2	Dosis 1; Frecuencia 2	40 t/ha Cada 2 años	400	5
3	Dosis 1; Frecuencia 3	40 t/ha Cada 4 años	200	2,5
4	Dosis 2; Frecuencia 1	80 t/ha Todos los años	1600	20
5	Dosis 2; Frecuencia 2	80 t/ha Cada 2 años	800	10
6	Dosis 2 Frecuencia 3	80 t/ha Cada 4 años	400	5
7	Abonado estándar	Únicamente abono mineral	0	0
8	Testigo sin abono	Ningún aporte fertilizante	0	0

Tabla 12 Tratamientos ensayados ,2013 (fuente Irañeta y col)

Las tablas siguientes muestran los resultados encontrados en el estudio:

Tratamiento	Metales pesados (ppm)						
	Cadmio (Cd)	Cromo (Cr)	Cobre (Cu)	Mercurio (Hg)	Niquel (Ni)	Plomo (Pb)	Zinc (Zn)
1: 40t F1	0,7 a	16,4 a	17,8 c	0,2	18,4 b	13,6 c	58,6 c
2: 40t F2	0,7 a	19,9 a	23,7 abc	0,1	24,1 a	17,7 abc	74,3 bc
3: 40t F4	0,7 a	22,0 a	22,7 abc		22,3 ab	22,4 abc	71,7 bc
4: 80t F1	0,7 a	22,6 a	27,2 a	0,2	24,9 a	20,3 abc	90,9 a
5: 80t F2	0,7 a	18,4 a	24,5 ab		23,2 ab	18,4 abc	80,7 ab
6: 80t F4	0,7 a	16,7 a	19,9 bc	0,1	22,3 ab	16,2 bc	63,9 c
7: Abonado estandar	0,7 a	17,3 a	19,2 bc	0,1	23,1 ab	15,9 bc	59,1 c
8: Testigo sin abono	0,7 a	16,5 a	20,9 bc	0,1	24,1 a	16,6 bc	62,5 c
Media general	0,7	18,7	22,0	0,1	22,8	17,6	70,2

Tabla 13 Contenido en metales pesados de las muestras de suelo de los distintos tratamientos ensayados (Última línea indica el límite establecido por el RD 1310/1990), 2013 (fuente Irañeta y col)

Tratamiento	Materia orgánica y nutrientes		
	M. Org (%)	P (ppm)	K (ppm)
1: 40t F1	2,23	91	149
2: 40t F2	2,33	84,3	163,7
3: 40t F4	2,55	98,3	135
4: 80t F1	2,89	117,7	154,3
5: 80t F2	2,45	102,7	145
6: 80t F4	2,41	62	156,3
7: Abonado estándar	2,04	42	169
8: Testigo sin abono	1,96	38	169,3

Tabla 14 Análisis de suelo respecto a los parámetros de fertilidad, 2013 (fuente Irañeta y col)

Con respecto a la evolución de los parámetros referentes al suelo, se puede observar diferencias respecto a materia orgánica y fósforo. Mejorando así la fertilidad del suelo debido al incremento de la materia orgánica. Ya que como se puede observar para las distintas frecuencias, tanto el porcentaje de materia orgánica como la concentración de fósforo van en aumento excepto por el ensayo en frecuencia 4.

En cuanto a los metales pesados adyacentes en el suelo, parece que la utilización de fangos como fertilizante no afecta al contenido en metales pesados del suelo. El único efecto significativo que se puede apreciar es en el contenido en cinc.

En el segundo estudio se pretende evaluar la eficiencia del Nitrógeno contenido en el residuo como en el fertilizante y realizar un seguimiento desde su aplicación, observándose que las eficiencias medias obtenidas del Nitrógeno aportado por el lodo para los cultivos utilizado como abono de fondo han sido de entre 30 y 35% el primer año, 20 y 25% el segundo y entre un 10-14% en el tercero.

Se llega a la conclusión en estos estudios, que la utilización de los lodos se trata de una práctica segura siempre que se respeten los requisitos legales exigidos.

Los lodos aportan una gran cantidad de nitrógeno, fósforo y materia orgánica haciendo que la producción sea más eficiente, que el suelo sea más fértil y que se pueda a su vez sustituir abonos minerales por lodos. Ya que prescindiendo de los abonos minerales, ahorramos recursos limitados.

Otro estudio donde se llevó a cabo el uso agrícola de lodos de depuradoras es el realizado por Polo, M. J., Ordoñez, R. y Giráldez, J. V. En el que se aplica estos lodos a cultivo de trigo y girasol. En concreto parcelas del Centro de Investigación y Formación Agraria de Córdoba entre 1994 y 1996.

El procedimiento llevado a cabo por los investigadores es similar al empleado en el estudio previo. Se tomaron 2 parcelas con el fin de estudiar diferentes dosis de lodos. Se recogieron parámetros relacionados con la fertilidad del suelo como el nitrógeno y fósforo aportado, parámetros relacionados con el efecto de los lodos sobre los cultivos, como puede ser el tamaño de los cultivos y su producción, y por último, el aporte de metales de los lodos sobre el suelo.

Se llega a una conclusión parecida a la del estudio anterior. El uso agrícola de lodos de depuradora incrementa la fertilidad de los suelos y aumenta la producción de los cultivos. No obstante, se destaca en el estudio que aportar una mayor dosis puede llegar a ser contraproducente ya que es sinónimo de un aporte en exceso de nitrógeno lo que se traduce en un crecimiento vegetativo desmesurado y esto puede llegar a ocasionar una disminución de la superficie activa del suelo. Esto llegándose a observar la siguiente figura, donde se relaciona el porcentaje de nitrógeno de la cosecha con las distintas dosis A y B (40t/ha y 80 t/ha respectivamente) con el testigo T.

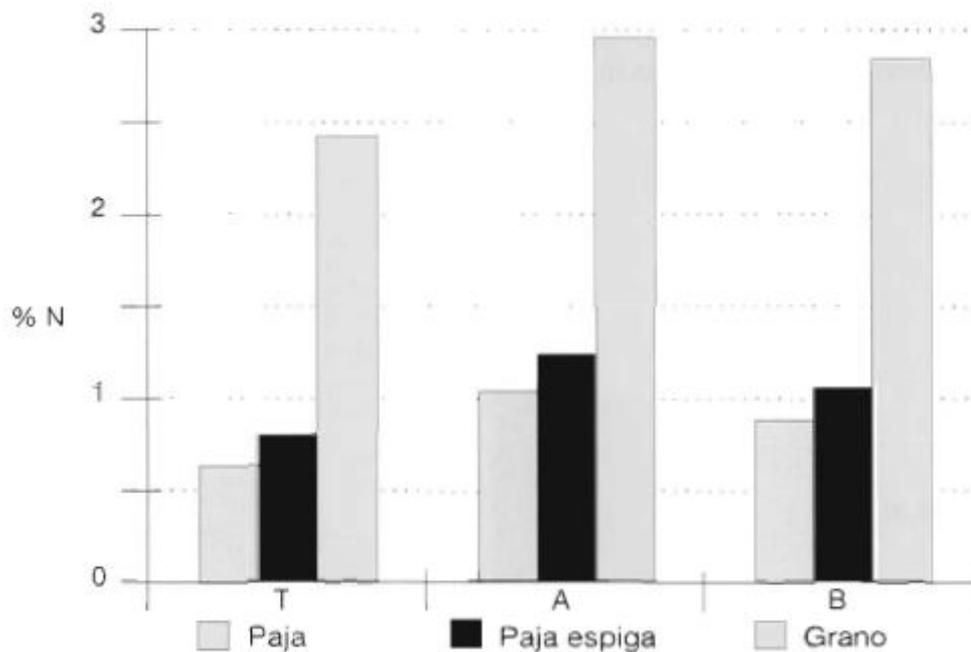


Figura 10 Niveles de Nitrógeno en la cosecha de trigo, 1997 (Fuente Polo y col.)

En cuanto a metales aportados, se comprueba que la aplicación controlada de los lodos en suelos no entraña un riesgo de asimilación de metales en los cultivos y que consiste en una práctica segura.

Giménez (2010) realizó un ensayo cuyo objetivo era el de valorar el rendimiento de dos tipos de cultivos diferentes, los cuales eran lechugas (*Lactuca sativa, L.*) y melones (*Cucumis melo, L.*), tratándolos con lodos sin compostar anaerobio (dosis LAN de 15 t/ha) y con lodos anaerobios obtenidos en proceso de compostaje (dosis CLAN-D1 y CLAN-D1 de 20 y 40 t/ha respectivamente). El estudio se realizó en la Finca Tomás Ferro, perteneciente a la Universidad Politécnica de Cartagena y ubicada en La Palma (Cartagena).

El resultado del estudio revela que no hubo una diferencia apreciable entre la productividad vegetal producida por los lodos en comparación con el suelo control para el caso de los melones. Sin embargo, si se presentó una diferencia notable para el caso de las lechugas, aumentando un 18,6% su peso medio sin variar el número de unidades producidas con respecto al suelo control.

Por otro lado, se llega a la conclusión mencionada con anterioridad en el estudio realizado por parte de Polo y col. en 1997 con respecto al caso de las dosis que se aplican a los cultivos. Especificándose que no genera una mejora de la productividad. Esto se puede observar en la figura 11, donde se puede encontrar de forma gráfica el porcentaje de nitrógeno en la cosecha de lechuga en función del tipo de lodo y la dosis.

Los resultados indican que los lodos no compostados dan buenos resultados, pero se desaconseja su utilización ya que supone un riesgo debido a su gran contenido en microorganismos patógenos.

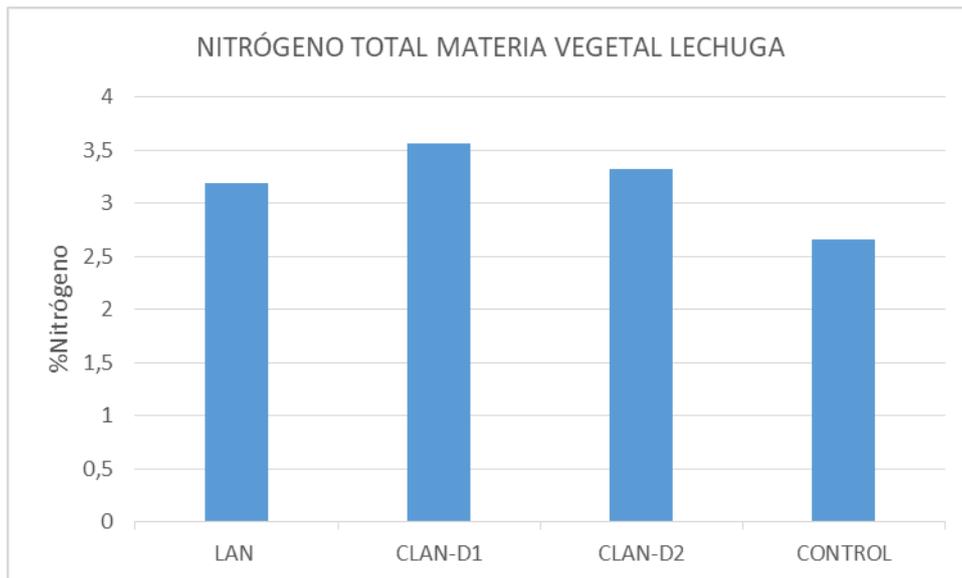


Figura 11 Niveles de Nitrógeno en la cosecha de lechuga, 2010 (Fuente Giménez)

Delgado y col. (2012) estudiaron la aplicación de varias dosis de lodo secado térmicamente sobre el suelo con el fin de valorar su fertilidad y cuáles podrían ser sus posibles riesgos de contaminación. Las dosis aplicadas fueron de 5, 8 y 12 t/ha cada año durante los cuatro años que duro el ensayo. Las especies o cultivos con los que se realizó el experimento fueron la cebada (*Hordeum vulgare* L.), la avena (*Avena sativa*) y el trigo (*Triticum aestivum*). El suelo tratado con lodos se comparó con suelos control y con suelos sobre los que aplicaron fertilización mineral.

Concluido el ensayo se llegó a la conclusión de que se debe utilizar unas dosis recomendadas para el aprovechamiento agronómico de los lodos, tal y como se dedujo en los dos estudios anteriores (Polo y col., 1997; Giménez, 2010).

Y de forma general se concreta que la fertilización con lodos secado térmicamente mejora la respuesta de los cultivos, mejorando los valores de producción con respecto al control y a la fertilización mineral sin que surjan problemas de contaminación por metales pesados.

### 3. Tratamientos para la reutilización de los fangos: Espesamiento

El espesamiento es un procedimiento utilizado en las EDARs con el fin de aumentar el contenido en sólidos de los lodos mediante la eliminación de una parte de la fracción líquida de su contenido. El espesamiento es un proceso que generalmente se vale de medios físicos para su desarrollo. Los métodos más comunes son: sedimentación por gravedad en el clarificador, sedimentación por gravedad, flotación por aire disuelto, centrifugación, espesamiento centrífugo y espesamiento por tambor rotatorio (Metcalf & Eddy, 1991).

Estos métodos típicos de espesamiento de lodos se describen en la siguiente figura, especificándose los lodos que se tratan en cada uno de estos y la frecuencia con la que son usados.

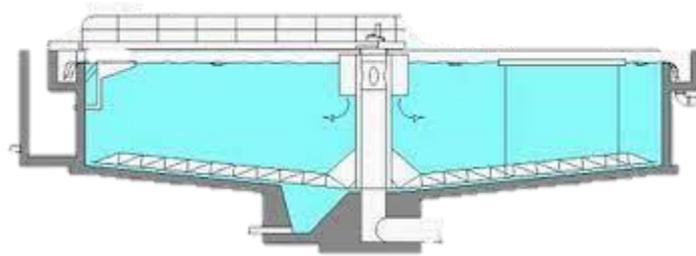
Método	Tipo de lodo a tratar	Frecuencia de uso
Sedimentación por gravedad en clarificador	Lodos primarios y residuos activados	Uso ocasional; puede afectar negativamente la eficacia de procesos como el clarificador primario.
Espesamiento por gravedad	Lodo primario sin tratar	Comúnmente utilizado con excelentes resultados.
	Lodos activados primarios y residuos sin tratar	Utilizado a menudo en plantas pequeñas donde el resultado suele ser generalmente satisfactorio. Para plantas grandes, los resultados son marginales.
	Lodos activados	Rara vez usado; mala concentración de sólidos.
Flotación por aire disuelto	Lodos activados primarios y residuos sin tratar	Rara vez usado; los resultados son similares a los obtenidos en los espesadores por gravedad.
	Lodos activados	Comúnmente usado, pero el uso está disminuyendo debido al alto costo de operación; buenos resultados.
Espesamiento centrífugo	Lodos activados	Utilizado a menudo; buenos resultados.
Espesado por cinturón de gravedad	Lodos activados	Utilizado a menudo con buenos resultados.
Espesamiento por tambor rotatorio	Lodos activados	Uso limitado; buenos resultados.

*Tabla 15 Lodos a tratar y ocurrencia de los distintos métodos de espesamiento, 1991 (Fuente Metcalf & Eddy)*

### 3.1. Métodos de espesamiento

#### 3.1.1. Sedimentación por gravedad en clarificadores

A menudo, los clarificadores primarios, se usan para espesar sólidos antes de pasar a proceso posteriores de la cadena de tratamientos de lodos. Para este tipo de espesamiento, se debe crear un manto conformado por lodos que consolide los sólidos sin dejar pasar el agua clarificada. Los tiempos de retención de sólidos suelen oscilar entre las 12 y 24 horas en clarificadores para lograr niveles óptimos de concentración de sólidos espesados. La retención excesiva de sólidos en el clarificador puede provocar condiciones sépticas y de gasificación, y reducir los niveles de eliminación de sólidos suspendidos totales y demanda bioquímica de oxígeno (Metcalf & Eddy, 1991).



*Figura 12 Tanque de sedimentación primaria (Clarificador), 2010 (Fuente Belzona)*

Los tanques de sedimentación primaria se caracterizan por ser recipientes circulares o rectangulares, los cuales contienen agua residual por varias horas con los objetivos de que las partículas más pesadas adyacentes en el agua a depurar, las cuales componen el lodo, se asienten en el fondo y que los materiales flotantes más ligeros como pueden ser grasas u otro tipo de residuos se eleven a la superficie. Todo esto con el fin de removerlo con los brazos rotatorios que se encuentran tanto en la superficie como en el fondo (Belzona, 2010).

#### 3.1.2. Espesamiento por gravedad

El método de espesamiento por gravedad es uno de los más comunes utilizados en estaciones depuradoras de aguas residuales. Este proceso se lleva a cabo en un tanque que comparte un diseño similar al de un tanque de sedimentación convencional. Normalmente, se utiliza un tanque que presenta una geometría circular y el lodo diluido se alimenta a un pozo de alimentación central. El lodo se deja asentar y compactar, y posteriormente, cuando este ya ha espesado se extrae del fondo cónico del tanque. El flujo de sobrenadante resultante se escurre y se devuelve al tanque de sedimentación principal o al afluente de la planta de tratamiento. El lodo espesado se envía a tratamientos posteriores como digestores o equipos de deshidratación, según se requiera. El espesamiento por gravedad es más eficaz en lodos primarios (Metcalf & Eddy, 1991).

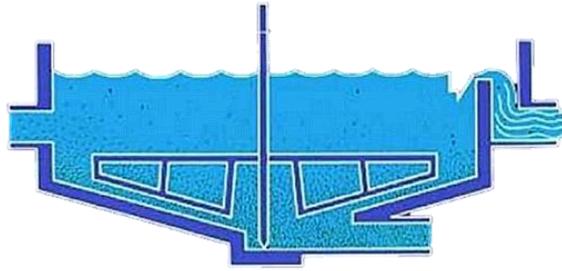


Figura 13 Espesador por gravedad (Fuente American Water Chemicals)

Se puede observar en la figura que representa un espesador por gravedad, la similitud que presenta este con un tanque de sedimentación primario (clarificador). Las diferencias son los objetivos que se plantean en cada uno. Si bien el clarificador es un tratamiento primario que se encarga de hacer que el agua reduzca su contenido en sólido y que se eliminen ciertas impurezas, en el espesador el único objetivo es el de espesar el lodo liberándolo del líquido.

### 3.1.3. Flotación por aire disuelto

En el método de flotación por aire disuelto, se introduce aire en una solución que se mantiene a una presión elevada. Cuando la solución se despresuriza, el aire es liberado en forma de burbuja el cual desplaza el lodo a la parte superior donde este es eliminado (Metcalf & Eddy, 1991). Este procedimiento se puede observar en la figura 14.

El espesamiento por flotación por aire disuelto se usa de manera más eficiente para lodos residuales de procesos de tratamiento biológico, como el proceso de lodos activados o el proceso de eliminación biológica del nitrógeno. Otros lodos como los primarios, digeridos aeróbicamente y lodos que contienen sales metálicas de tratamientos químicos, se han espesado mediante el método de flotación (Metcalf & Eddy, 1991).

La concentración de sólidos suspendidos que se puede obtener mediante el espesamiento por flotación de lodos activados está influenciada principalmente por la relación aire-sólidos, las características de lodo, la tasa de carga de sólidos y la aplicación de polímeros. El factor más importante es la relación aire-sólidos ya que afecta al rendimiento del espesador de flotación, y se define como la relación de peso del aire disponible para la flotación de sólidos que entran por el canal de alimentación (Metcalf & Eddy, 1991).

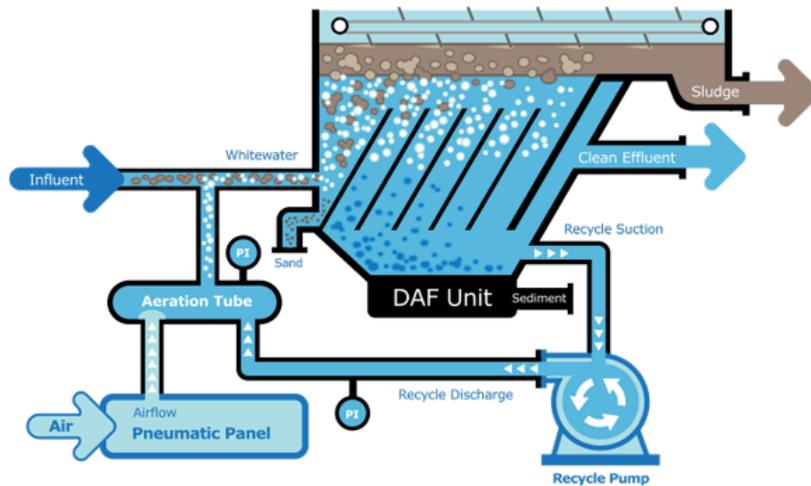


Figura 14 Sistema de flotación por aire disuelto, 2017 (Fuente Ozoniq)

### 3.1.4. Espesamiento centrífugo

Las centrifugadoras se utilizan tanto para espesar como para deshidratar lodos. Su aplicación en el espesamiento se limita normalmente a los lodos activados de procedencia residual. El espesamiento por centrifugación implica la sedimentación de las partículas de lodo bajo la influencia de fuerzas centrífugas. El tipo básico o general de centrifugadora utilizada para espesar lodos es la centrifugadora de recipiente sólido (Metcalf & Eddy, 1991).

La centrifugadora de recipiente sólido está conformada de un recipiente largo, comúnmente montado de forma horizontal y cónica en un extremo. El lodo se introduce en la centrifugadora de forma continua y los sólidos se concentran en la zona más inmediata al exterior del recipiente. Una espiral helicoidal interna, la cual gira a una velocidad ligeramente diferente a la centrifugadora, mueve el lodo que va acumulándose hacia el extremo cónico donde se produce una concentración adicional de sólidos y se descarga el lodo espesado (Metcalf & Eddy, 1991). Esto se puede observar en la figura que se muestra a continuación:

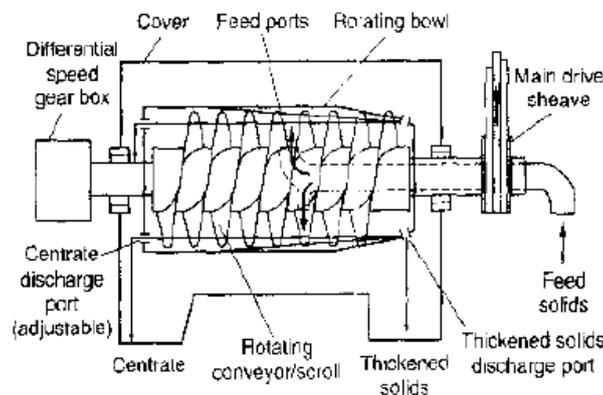


Figura 15 Sistema de espesamiento centrifugo, 1991 (Fuente Metcalf & Eddy)

### 3.1.5. Espesado por cinturón de gravedad

El desarrollo de los espesadores de cinta por gravedad surgió de la aplicación de prensas de cinta para la deshidratación de lodos. Cuando se utilizó la prensa de banda para deshidratar lodo, se produjo un espesamiento efectivo en la sección de drenaje por gravedad de la propia prensa. Los equipos que utilizan el método de espesado por cinturón de gravedad consisten en una cinta de gravedad que se desplaza sobre rodillos accionados por un grupo de motores cuya velocidad es variable. El lodo se acondiciona con polímero y se lleva a una caja de alimentación/distribución en un extremo, donde el lodo se estira debido a una serie de palas de arado colocadas a lo largo de la cinta, lo que permite que el agua liberada del lodo pase a través del cinturón. Una vez retirado el lodo espesado, la banda pasa por un ciclo de lavado (Metcalf & Eddy, 1991).

El espesador de cinta de gravedad se ha utilizado para espesar lodos activados por desechos, lodos digeridos anaeróbica y aeróbicamente, y algunos lodos industriales (Metcalf & Eddy, 1991).

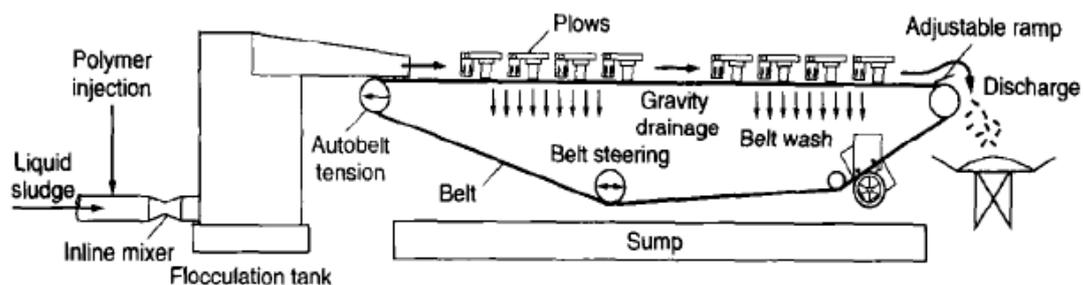


Figura 16 Sistema de espesamiento por cinturón de gravedad, 1991 (Fuente Metcalf & Eddy)

### 3.1.6. Espesamiento por tambor rotatorio

Los tambores rotatorios cubiertos con determinados medios se pueden utilizar para el espesamiento de lodos. Un sistema de espesamiento de tambor rotatorio consta de un sistema de acondicionamiento y tamices cilíndricos rotatorios. Se mezcla un polímero con lodo diluido en el tambor de mezcla y acondicionamiento. El lodo acondicionado se pasa a los tambores de criba rotatoria, que separan los sólidos floculados del agua. Los lodos espesados ruedan por el extremo de los tambores, mientras que el agua separada es decantada. En algunos diseños también permiten el acoplamiento de la unidad de tambor rotatorio a un filtro prensa de banda para el espesamiento combinado y la deshidratación (Metcalf & Eddy, 1991).

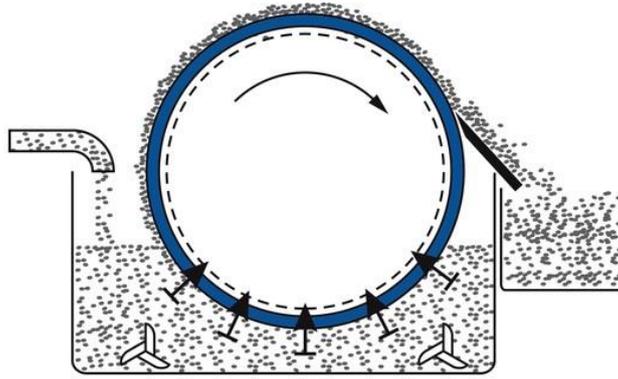


Figura 17 Sistema de espesamiento por tambor rotatorio (Fuente Sefar)

#### 4. Tratamientos para la reutilización de los fangos: Estabilización

Los lodos se estabilizan con el fin de reducir los organismos patógenos, eliminar los olores que estos desprenden e inhibir, reducir o eliminar el potencial de putrefacción. El éxito en el logro de estos objetivos está relacionado con los efectos de la operación o proceso de estabilización sobre la fracción volátil u orgánica de los lodos. La supervivencia de patógenos, la liberación de olores y la putrefacción ocurren cuando se permite que los microorganismos, adyacentes en los lodos, fluyan en la fracción orgánica. Los medios para eliminar estas condiciones se relacionan principalmente con la reducción biológica del contenido volátil y la adición de productos químicos a los lodos para hacer el medio inadecuado para la supervivencia de los microorganismos (Metcalf & Eddy, 1991).

Los procesos de estabilización no se emplean en todas las plantas de tratamiento de aguas residuales, pero es utilizada en una gran mayoría de plantas independientemente del tamaño de estas. Además de las razones sanitarias, la estabilización se utiliza para la reducción de volumen, la producción de biogás y la mejora del proceso de secado de los lodos (Metcalf & Eddy, 1991).

Los principales métodos, los cuales se describirán en apartados posteriores, utilizados para la estabilización de lodos son: la estabilización alcalina, la digestión anaeróbica, la digestión aeróbica y el compostaje. Estos procesos vienen relacionados, en la siguiente tabla, en función a la capacidad que tienen para mitigar o estabilizar los distintos parámetros de patógenos, putrefacción y olores.

Proceso	Grado de atenuación		
	Patógenos	Putrefacción	Olor
Estabilización alcalina	Bueno	Regular	Regular
Digestión anaeróbica	Regular	Bueno	Bueno
Digestión aeróbica	Regular	Bueno	Bueno
Compostaje	Regular	Bueno	Pobre

Tabla 16 Diferentes métodos de estabilización en función del grado de atenuación de parámetros relacionados con microorganismos, 1991 (Fuente Metcalf & Eddy)

## 4.1. Métodos de estabilización

### 4.1.1. Estabilización alcalina

Es un método que hace uso de material alcalino para hacer que el lodo no sea apto para la supervivencia de los microorganismos. En este proceso de estabilización se suelen utilizar principalmente cal ( $\text{CaO}$ ) e hidróxido de calcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ). Estos se agregan al lodo sin tratar en cantidades suficientes con el fin de elevar el pH como mínimo a 12. El pH alto crea un entorno que detiene o retarda sustancialmente las reacciones microbianas que, del contrario, pueden conducir a la producción de olores. El lodo no se pudrirá, creará olores ni representará un peligro para la salud siempre que el pH se mantenga en este nivel. El proceso también puede inactivar virus, bacterias y otros microorganismos presentes (Metcalf & Eddy, 1991).

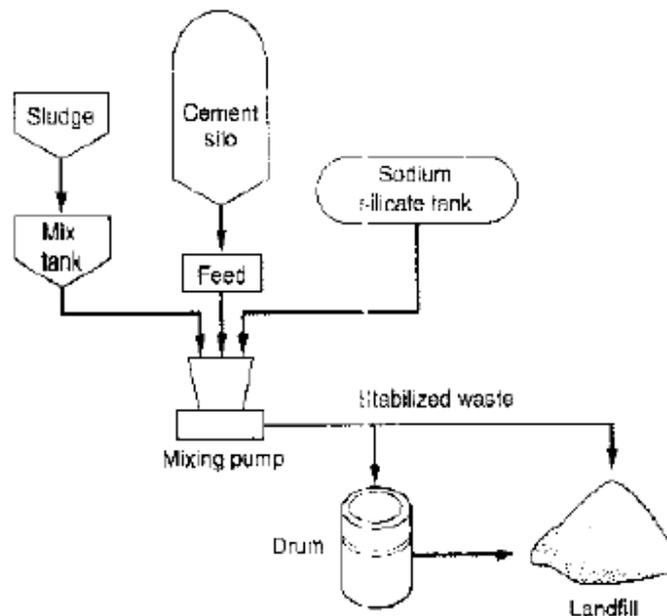


Figura 18 Sistema de estabilización alcalina, 1991 (Fuente Metcalf & Eddy)

En la figura se puede observar el proceso de estabilización alcalina. En una bomba mezcladora, se añaden los lodos y el material alcalino acompañado de un agente estructurante. Al elevar el pH el lodo estabilizado se impulsa desde la propia bomba a un proceso de secado o directamente a su vertido.

#### 4.1.2. Digestión anaeróbica

La digestión anaeróbica es uno de los procesos más antiguos utilizados para la estabilización de lodos. Este método implica la descomposición de materia orgánica e inorgánica en ausencia de oxígeno molecular. Las principales aplicaciones de la digestión anaeróbica se encuentran en la estabilización de lodos concentrados producidos en el tratamiento de aguas residuales municipales e industriales (Metcalf & Eddy, 1991).

Debido al énfasis en la conservación y recuperación de energía y la conveniencia de obtener un uso beneficioso de los lodos, la digestión anaeróbica sigue siendo el proceso dominante para estabilizar lodos. Además, la digestión anaeróbica de lodos de aguas residuales municipales puede, en muchos casos, producir suficiente gas como para satisfacer la mayoría de las necesidades energéticas para el funcionamiento de la propia planta de tratamiento (Metcalf & Eddy, 1991).

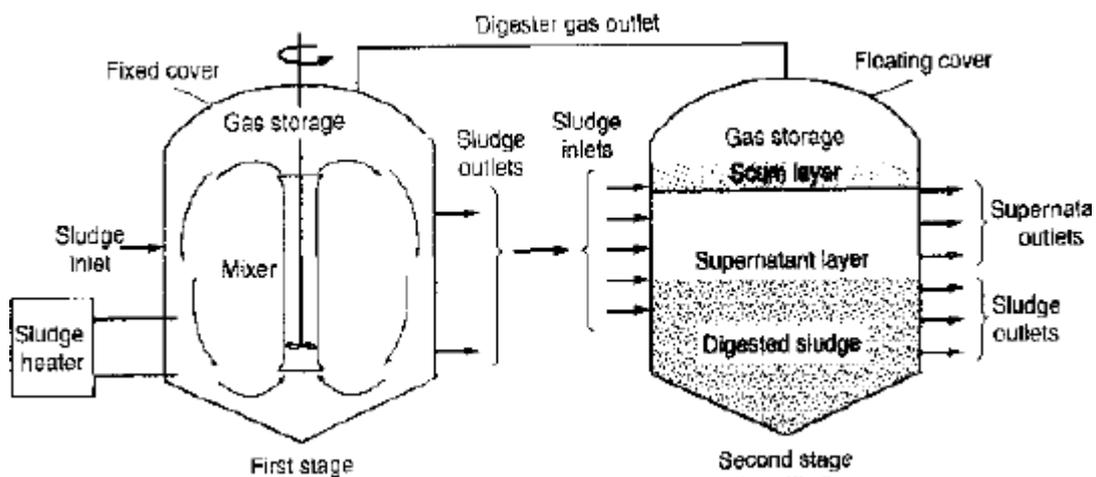


Figura 19 Etapas de un sistema de estabilización anaeróbica, 1991 (Fuente Metcalf & Eddy)

Se puede apreciar en la figura 19 las distintas etapas de un proceso de estabilización anaeróbica. En la primera etapa se acondiciona el lodo, mezclándolo y calentándolo para darle paso al biodigestor o digestor biológico. El biodigestor es básicamente un contenedor cerrado, hermético e impermeable, dentro del cual se lleva a cabo la fermentación anaeróbica de los microorganismos presentes en los lodos. Se observa en la figura, que en la segunda etapa, se separa del biodigestor el sobrenadante, los gases generados por la fermentación de los microorganismos y el lodo ya estabilizado.

### 4.1.3. Digestión aeróbica

La digestión aeróbica puede utilizarse para tratar únicamente lodos activados, mezclas de lodos activados y lodos primarios, o lodos residuales de plantas de aireación prolongada. Las ventajas que presenta la digestión aeróbica frente a la digestión anaeróbica son: la reducción de sólidos volátiles en un digester aeróbico bien operado es aproximadamente igual a la que se obtiene anaeróbicamente; menores concentraciones de demanda bioquímica de oxígeno; producción de un producto final inodoro y biológicamente estable; recuperación de más de los valores de fertilizante básicos en el lodo; la operación es relativamente fácil; menor costo de capital; y la idoneidad para digerir lodos ricos en nutrientes. Las principales desventajas del proceso de digestión aeróbica son: el alto costo de energía, el cual está asociado con el suministro de oxígeno requerido; los lodos digeridos producidos tienen peores características mecánicas de deshidratación; y el proceso se ve afectado significativamente por la temperatura, la ubicación, la geometría del tanque, la concentración de sólidos de alimentación, el tipo de dispositivo de mezcla/aireación y el tipo de material del tanque. Una desventaja adicional es que no se recupera un subproducto útil como es el metano (Metcalf & Eddy, 1991).

La digestión aeróbica es similar al proceso de lodos activados, ya que se utiliza aire u oxígeno y microorganismo con el fin de oxidar biológicamente la materia orgánica. A medida que se agota el suministro de sustrato disponible, los microorganismos comienzan a consumirse a sí mismos para obtener energía para las reacciones de mantenimiento celular. La materia orgánica se oxida aeróbicamente a dióxido de carbono, agua y amoníaco. Alrededor del 75 a 80% de la materia orgánica puede oxidarse y el 20 o 25% restante está compuesto de componentes inertes y compuestos orgánicos que no son biodegradables (Metcalf & Eddy, 1991).

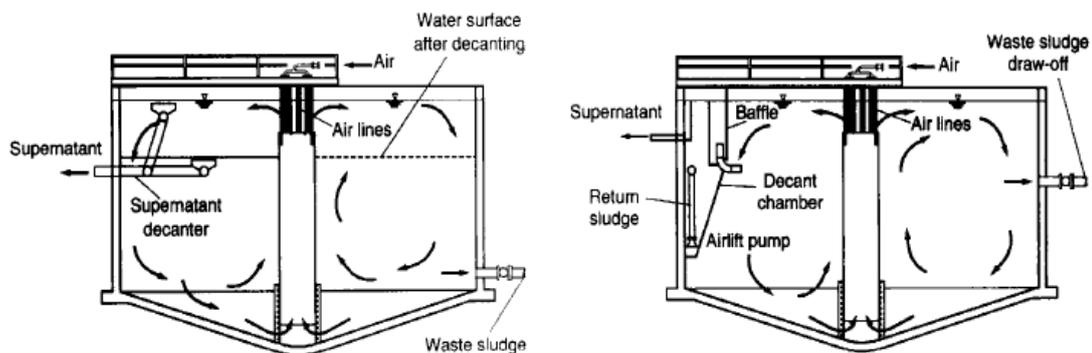


Figura 20 Sistemas de digestión aerobia de tipo discontinua (izquierda) y continua (derecha), 1991 (Fuente Metcalf & Eddy)

El proceso de digestión aeróbica, como se puede observar en la figura, consta de recipientes a los que se le proporcionan un flujo constante de oxígeno u aire para llevar a cabo la oxidación biológica de la materia orgánica. En la imagen de la izquierda se observa un proceso de digestión aeróbica discontinuo en el que se añaden los lodos y una vez realizado el proceso se retira el sobrenadante y los lodos estabilizados. Y en la otra imagen se observa este mismo proceso pero de forma continua, donde se añade una corriente constante de alimentación y se van retirando los lodos estabilizados y el sobrenadante.

#### 4.1.4. Compostaje

El compostaje es una alternativa rentable y ambientalmente racional para la estabilización de lodos de aguas residuales. Las regulaciones cada vez más estrictas sobre la contaminación del aire y los requisitos de eliminación de lodos, esto ha acelerado el desarrollo del compostaje como una opción viable para el manejo de lodos (Metcalf & Eddy, 1991).

El compostaje es un proceso en el que la materia orgánica se degrada biológicamente hasta convertirse en un producto estable. Aproximadamente del 20 al 30 por ciento de los sólidos volátiles se convierten en dióxido de carbono y agua. A medida que se descompone la materia orgánica en el lodo, el compost se calienta a temperaturas en el rango de pasteurización de 50 a 70°C y se destruyen los organismos patógenos entéricos. Los lodos debidamente compostados se pueden usar como acondicionadores del suelo en aplicaciones agrícolas u hortícolas, sujeto a cualquier limitación basada en los constituyentes de los lodos compostados (Metcalf & Eddy, 1991).

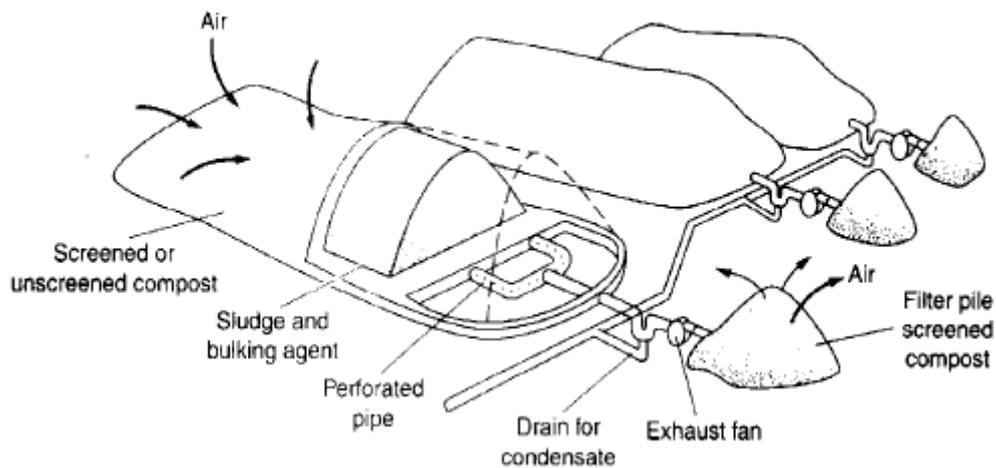


Figura 21 Proceso de compostaje, 1991 (Fuente Metcalf & Eddy)

En la imagen se puede observar cómo se realiza un proceso de compost de lodo. Se mezcla este con un agente estructurante como puede ser paja triturada con el fin de regular la humedad, ya que los lodos presentan un gran contenido en agua que no es adecuado para el desarrollo de la actividad biológica. El lodo se va drenando y depositando para su aireación finalizando así su proceso de estabilización.

A modo de resumen, a continuación se presenta una tabla que proporciona una breve descripción de los procesos de estabilización mencionados anteriormente.

Proceso	Descripción	Proceso	Descripción
<b>Estabilización alcalina</b>	Consta de la adición de un material alcalino, generalmente cal, para mantener un alto nivel de pH para efectuar la destrucción de organismos patógenos.	<b>Digestión aeróbica</b>	Es la conversión biológica de materia orgánica en presencia de aire u oxígeno (de ahí su nombre de digestión aeróbica). Se utiliza generalmente un tanque abierto.
<b>Digestión anaeróbica</b>	Trata de ejecutar una conversión biológica de materia orgánica por fermentación en un reactor previamente calentado para la producción de gas metano y dióxido de carbono. La fermentación se produce en ausencia de oxígeno, de ahí el nombre digestión anaeróbica.	<b>Compostaje</b>	Es la conversión biológica de materia orgánica sólida en un reactor cerrado.

*Tabla 17 Descripción a modo de resumen de los procesos de estabilización, 1991 (Fuente Metcalf & Eddy)*

## 5. Tratamientos para la reutilización de los fangos: Deshidratado

La deshidratación es una operación física utilizada para reducir el contenido de humedad de los lodos debido a una o más de las siguientes razones (Metcalf & Eddy, 1991):

- El costo de transporte de lodos al sitio de disposición final se vuelve sustancialmente más bajo cuando el volumen se reduce por deshidratación.
- Los lodos deshidratados son generalmente más fáciles de manejar que los lodos espesados o líquidos.
- La deshidratación se requiere normalmente antes de la incineración del lodo para aumentar el poder calorífico mediante la eliminación del exceso de humedad.
- Es necesario deshidratar antes del compostaje para reducir la necesidad de agentes de carga suplementarios o enmiendas.
- En algunos casos, puede ser necesario eliminar el exceso de humedad para que los lodos no tengan olor ni se pudran.
- Se requiere la deshidratación antes de depositar los lodos en vertederos para reducir la producción de lixiviados en el vertedero.

Se utilizan varias técnicas en los dispositivos de deshidratación para eliminar la humedad. Algunas de estas técnicas se basan en la evaporación y percolación naturales para deshidratar los sólidos. En los dispositivos mecánicos de deshidratación, se utilizan medios físicos asistidos mecánicamente para deshidratar el lodo de forma más rápida. Los medios físicos incluyen: filtración, compresión, separación y compactación centrífuga (Metcalf & Eddy, 1991).

## 5.1. Métodos de deshidratación

### 5.1.1. Centrifugación en recipiente sólido

En este método el lodo se introduce a un caudal constante en el recipiente giratorio, donde se separa en una torta densa que contiene los sólidos y una corriente diluida. El concentrado contiene sólidos finos de baja densidad y se devuelve al sistema de tratamiento de aguas residuales. La torta de lodo, que contiene aproximadamente entre un 70 y un 80% de humedad, se descarga del recipiente mediante un alimentador en una tolva o cintra transportadora (Metcalf & Eddy, 1991).

Las centrifugadoras de recipiente sólido generalmente son adecuadas para una variedad de aplicaciones de deshidratación. Las unidades se pueden usar para deshidratar lodos sin acondicionamiento químico previo, pero la captura de sólidos y la calidad de la corriente diluida mejoran considerablemente cuando los sólidos se acondicionan con polímeros (Metcalf & Eddy, 1991).

El proceso de centrifugación en recipiente sólido es exactamente el mismo que el método de espesamiento centrífugo mostrado en la figura 15.

### 5.1.2. Prensa de filtro de banda

Los filtros prensa de banda son dispositivos de deshidratación de alimentación continua que utilizan los principios de acondicionamiento químico, drenaje por gravedad y presión aplicada mecánicamente para la deshidratación de los lodos. El filtro prensa de banda ha demostrado ser efectivo para casi todos los tipos de lodos de aguas residuales municipales (Metcalf & Eddy, 1991).

En la mayoría de los tipos de filtros prensa de banda, el lodo acondicionado se introduce primero en una sección de drenaje por gravedad donde se deja espesar. En esta sección, la mayor parte del agua libre se extrae del lodo por gravedad. En algunas unidades, esta sección cuenta con asistencia de vacío, lo que mejora el drenaje y puede ayudar a reducir los olores. Después del drenaje por gravedad, se aplica presión en una sección de baja presión, donde el lodo se comprime entre correas de tela. En algunas unidades, la sección de baja presión va seguida de una sección de alta presión en la que el lodo se somete a fuerzas de cizallamiento a medida que las membranas pasan por una serie de rodillos. Las fuerzas de compresión y cizallamiento

inducen así la liberación de cantidades adicionales de agua del lodo. La torta de lodo deshidratada final se elimina de las correas mediante cuchillas rascadoras (Metcalf & Eddy, 1991). En la actualidad estos procesos presentan rendimientos inferiores a los sistemas centrífugos. Este proceso se puede observar en el esquema mostrado a continuación:

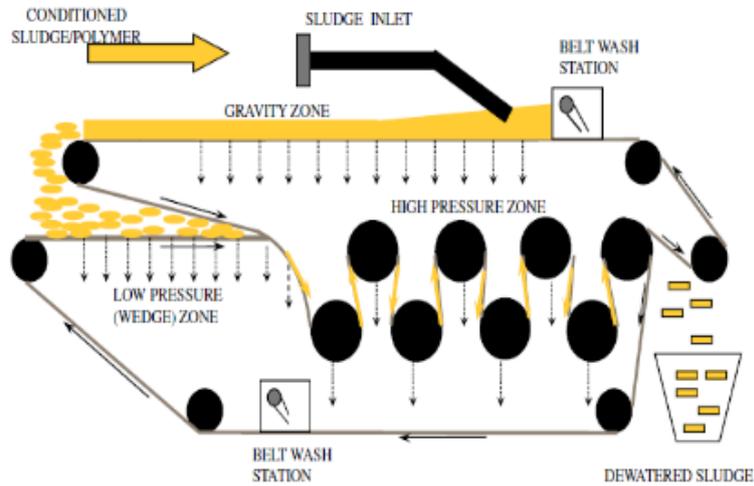


Figura 22 Esquema de funcionamiento del método de deshidratación por prensa de filtro de banda, 2017 (Fuente Alfa Laval)

### 5.1.3. Filtro prensa de placas empotradas

En un filtro prensa, la deshidratación se logra forzando el agua del lodo a alta presión. Los filtros prensa de placas empotradas están formados por una serie de placas rectangulares, empotradas por ambos lados, que se apoyan cara a cara en posición vertical sobre un bastidor de cabezal fijo y móvil. Se cuelga o coloca una tela filtrante sobre cada placa. Las placas se mantienen unidas con fuerza suficiente para resistir la presión aplicada durante el proceso de filtración (Metcalf & Eddy, 1991). Los sistemas centrífugos permiten alcanzar rendimientos superiores.

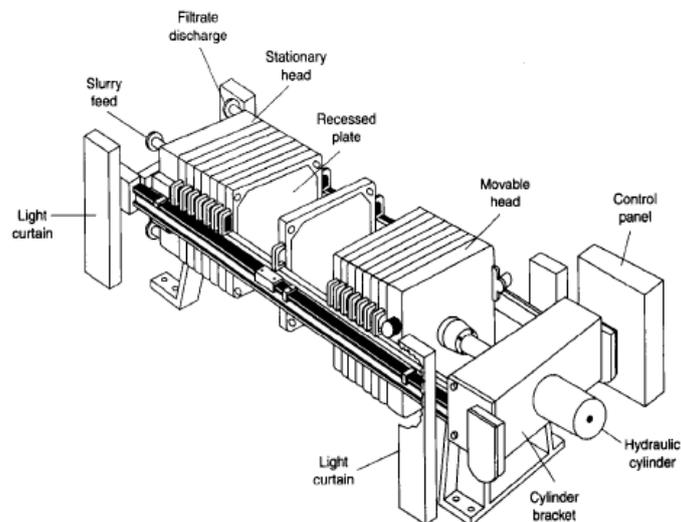


Figura 23 Esquema de funcionamiento del método de deshidratación por filtro prensa de placas empotradas, 1991 (Fuente Metcalf & Eddy)

#### 5.1.4. Lecho de secado de lodos

Los lechos de secado de lodos se usan típicamente para deshidratar lodos digeridos y sedimentar lodos de plantas usando el proceso de tratamiento de lodos activados de aireación prolongada sin espesamiento previo. Después del secado, los sólidos se eliminan y se procede a su vertido o se utilizan como acondicionador del suelo. Existen muchos métodos de lechos de secado de lodos y estos son algunos de ellos: arena convencional, pavimentada, medios artificiales, asistido por vacío y solar. Los más utilizados son los secaderos convencionales de arena y pavimentados (Metcalf & Eddy, 1991).

##### 5.1.4.1. Lechos de secado de arena convencionales

Los lechos de secado de arena convencionales se utilizan generalmente para comunidades pequeñas y medianas. En un lecho de secado de arena típico, el lodo se coloca sobre el lecho en una capa de 200 a 300 mm y se deja secar. El lodo se deshidrata por drenaje a través de la masa de lodo y la arena de soporte y por evaporación desde la superficie expuesta al aire. La mayor parte del agua sale del lodo por drenaje; por lo tanto, la provisión de un sistema de drenaje subterráneo adecuado es esencial (Metcalf & Eddy, 1991).

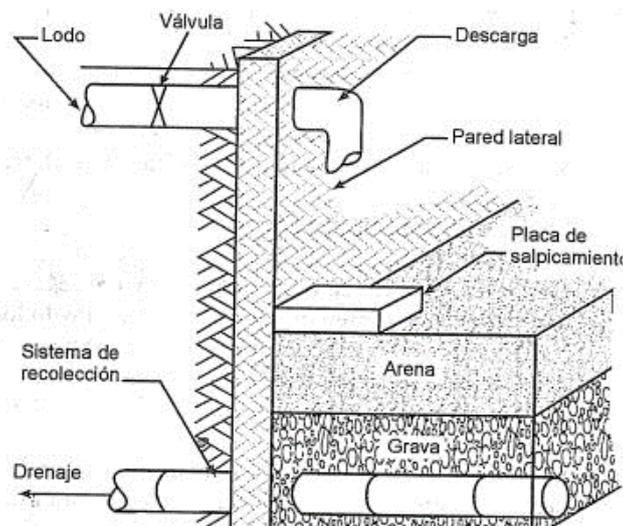


Figura 24 Esquema de funcionamiento del método de deshidratación de lechos de secado de arena convencional, 2016 (Fuente Galeano y col)

##### 5.1.4.2. Secaderos pavimentados

Hay dos tipos de lechos de secado pavimentados, estos son: un tipo de drenaje y un tipo de decantación. El tipo de drenaje funciona de manera similar a un lecho convencional en el sentido de que se recolecta el drenaje inferior, pero se mejora la eliminación de lodos mediante el uso de un cargador frontal. Para una cantidad dada de lodo, este tipo de lecho de secado pavimentado requiere más área que los lechos de arena convencionales (Metcalf & Eddy, 1991).

El tipo de lecho de secado pavimentado por decantación es ventajoso para climas cálidos, áridos y semiáridos. Este tipo de lecho de secado utiliza lechos pavimentados impermeables de bajo costo que dependen de la decantación del sobrenadante y la mezcla del lodo de secado para mejorar la evaporación. La decantación puede eliminar alrededor del 20 al 30 % del agua con un buen lodo de sedimentación (Metcalf & Eddy, 1991).

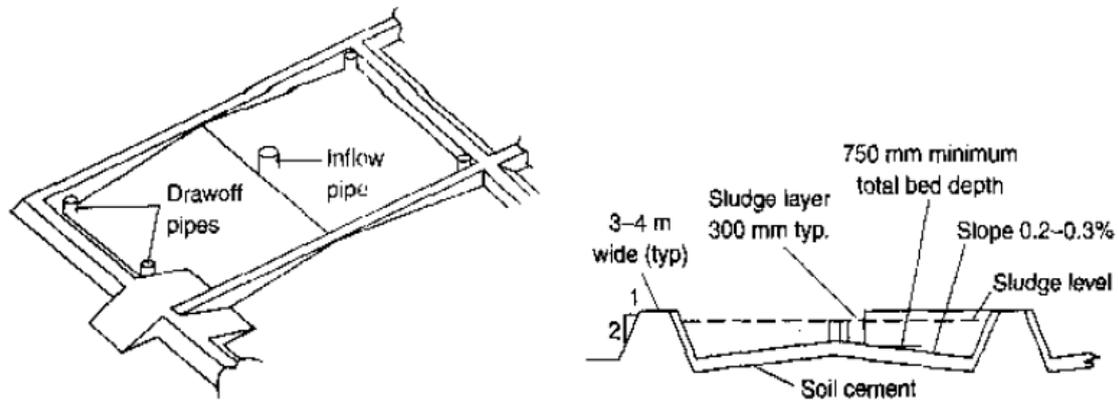


Figura 25 Esquema de funcionamiento del método de deshidratación de lechos de secado pavimentado, 1991  
(Fuente Metcalf & Eddy)

#### 5.1.4.3. Lechos de secado con medios artificiales

Se pueden utilizar medios artificiales, como alambre de acero inoxidable o poliuretano de alta densidad formado en paneles. En un lecho de secado de alambre, el lodo líquido se introduce en un medio de drenaje horizontal relativamente abierto. El medio consta de pequeñas barras de acero inoxidable en forma de cuña con la parte plana en la parte superior. El número de ciclos de funcionamiento varía según las condiciones climáticas locales. Los costos de capital son más altos que los de las camas de secado convencionales (Metcalf & Eddy, 1991).

En el sistema de medios de poliuretano de alta densidad, se forman paneles cuadrados entrelazados para su instalación en una losa inclinada o en bandejas prefabricadas de acero autodescargables. Cada panel tiene un porcentaje de área abierta para desagüe y contiene un sistema de drenaje inferior incorporado. Las ventajas de este método de deshidratación son: los lodos diluidos se pueden deshidratar, incluidos los lodos activados por desechos digeridos aeróbicamente, el filtrado contiene pocos sólidos en suspensión y las unidades fijas se pueden limpiar fácilmente con un cargador frontal. Las tasas de secado son comparables a las de los medios de alambre en cuña (Metcalf & Eddy, 1991).

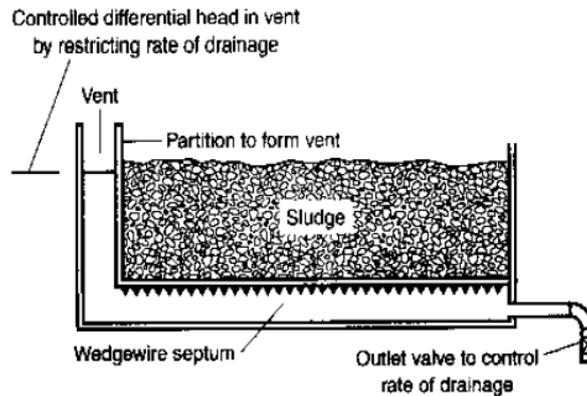


Figura 26 Esquema de funcionamiento del método de deshidratación de lechos de secado artificial, 1991 (Fuente Metcalf & Eddy)

#### 5.1.4.4. Lechos de secado asistidos por vacío

Un método utilizado para acelerar la deshidratación y el secado es el lecho de secado de lodos asistido por vacío. La deshidratación y el secado son asistidos por la aplicación de vacío en la parte inferior de las placas de filtro porosas. La operación de este método consiste generalmente en los siguientes pasos: precondicionamiento de los lodos con un polímero, llenado de los lechos con lodos, deshidratación de los lodos inicialmente por drenaje por gravedad seguido de la aplicación de vacío, permitiendo que los lodos se sequen al aire durante aproximadamente 24 a 48 horas. Por último, eliminación de los lodos ya deshidratados mediante un cargador frontal y lavado de la superficie de las placas porosas con una manguera de alta presión para eliminar los residuos restantes (Metcalf & Eddy, 1991).

#### 5.1.4.5. Lechos de secado solar

Un método utilizado para mejorar la deshidratación y el secado de lodos líquidos, espesados o deshidratados es el secado solar en lechos de secado cubiertos. El sistema de secado solar, es una especie de “invernadero” sofisticado, consta de una estructura de base rectangular, una cámara translúcida, sensores para medir las condiciones atmosféricas de secado, rejillas de ventilación, ventiladores, un dispositivo electromecánico móvil que agita y mueve los lodos en secado y un microprocesador que controla el ambiente de secado. La principal fuente de energía de secado del sistema es la radiación solar (Metcalf & Eddy, 1991).

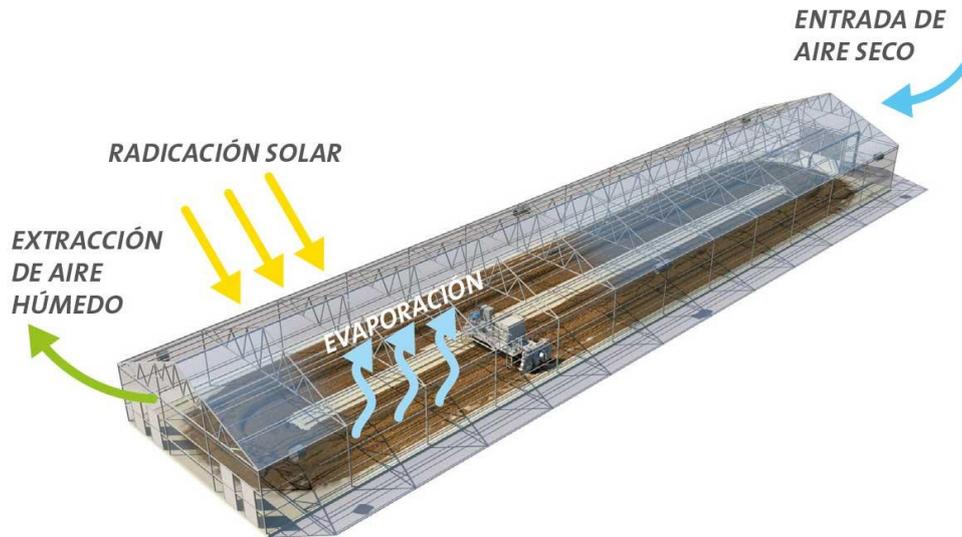


Figura 27 Esquema de funcionamiento del método de deshidratación de lechos de secado solar, 2016 (Fuente Interempresas)

#### 5.1.5. Lagunas

Las lagunas de secado pueden utilizarse como sustituto de los lechos de secado para deshidratar los lodos digeridos. Las lagunas no son adecuadas para deshidratar lodos no tratados o lodos con un sobrenadante de alta concentración. El comportamiento de las lagunas, al igual que el de los lechos de secado, se ve afectado por el clima; las precipitaciones y las bajas temperaturas que inhiben la deshidratación. Las lagunas son más aplicables en áreas con altas tasas de evaporación. La deshidratación por drenaje subterráneo y percolación está limitada por regulaciones ambientales y de aguas subterráneas cada vez más estrictas (Metcalf & Eddy, 1991).

Los lodos digeridos no acondicionados se descargan a la laguna de una manera adecuada para lograr una distribución uniforme. La evaporación es el principal mecanismo de deshidratación. Normalmente se proporcionan instalaciones para decantar el sobrenadante y el líquido se recicla a la instalación de tratamiento. Los lodos se eliminan mecánicamente. El tiempo de ciclo de las lagunas varía de varios meses a varios años. Un mínimo de dos celdas es esencial, incluso en plantas muy pequeñas, para garantizar la disponibilidad de espacio de almacenamiento durante condiciones de limpieza, mantenimiento o emergencia (Metcalf & Eddy, 1991).

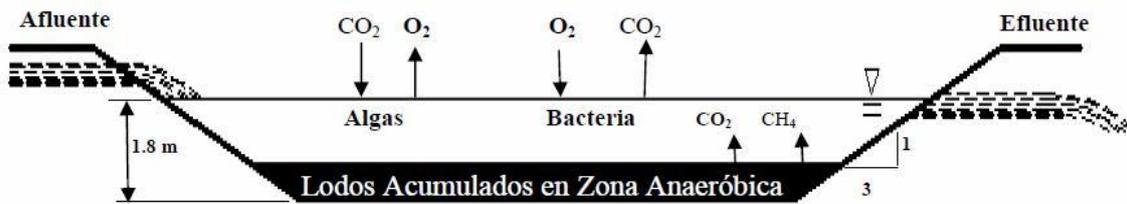


Figura 28 Esquema de funcionamiento de lagunas de secado de lodos, 2018 (Fuente Largo y col.)

La siguiente tabla muestra los diferentes tipos de métodos de deshidratación con sus ventajas y desventajas.

Método	Ventajas	Desventajas
Centrifugación en recipiente sólido	Apariencia limpia, buena contención de olores, capacidades de inicio y apagado rápidos. Produce una torta de lodo relativamente seca. Relación entre costo de capital y capacidad baja. Alta relación entre capacidad instalada y área de construcción	Desgaste de desplazamiento potencialmente un problema de alto mantenimiento. Requiere remoción de arena y posiblemente una trituradora de lodos en la corriente de alimentación. Se requiere personal de mantenimiento calificado. Contenido de sólidos en suspensión moderadamente alto en el concentrado.
Prensa de filtro de banda	Bajo requerimiento de energía. Costo operativo y de capital relativamente bajo. Menos complejo mecánicamente y es más fácil de mantener. Las máquinas de alta presión son capaces de producir una torta muy seca.	Alto potencial de olor. Requiere molino de lodos en la corriente de alimentación. Muy sensible a las características de alimentación del lodo entrante. Por lo general, no se recomienda el funcionamiento automático.
Filtro prensa de placas empotradas	Mayor concentración de sólidos de torta. Bajo contenido de sólidos en suspensión en el filtrado.	Operación por lotes. Alto costo del equipo. Alto costo de mano de obra. Requerimientos especiales de estructuras de soporte. Se requiere una gran área de piso para el equipo. Se requiere personal de mantenimiento calificado. Los sólidos adicionales debido a la gran adición de productos químicos requieren eliminación.
Lecho de secado de lodos	Método de costo de capital más bajo donde la tierra está fácilmente disponible. Se requiere poca atención y habilidad del operador. Bajo consumo de energía. Consumo bajo o nulo de productos químicos. Menos sensible a la variabilidad del lodo. Mayor contenido de sólidos que los métodos mecánicos.	Requiere gran superficie de terreno. Requiere lodos estabilizados. El diseño requiere la consideración de los efectos climáticos. La eliminación de lodos requiere mucha mano de obra.
Lagunas de lodos	Bajo consumo de energía. Sin consumo de productos químicos. La materia orgánica se estabiliza aún más. Bajo costo de capital donde hay tierra disponible. Menos cantidad de habilidad requerida para la operación.	Potencial de problemas de olores y vectores. Potencial de contaminación de las aguas subterráneas. Más uso intensivo de la tierra que los métodos mecánicos. La apariencia puede ser desagradable. El diseño requiere la consideración de los efectos climáticos.

Tabla 18 Ventajas y desventajas de los métodos de secado de lodos, 1991 (Fuente Metcalf & Eddy)

## 6. Implantación de la reutilización de fangos en la EDAR de Valle de Guerra

### 6.1. Situación de la gestión de lodos en Canarias y línea de tratamiento propuesta

No existen muchos documentos oficiales sobre la gestión y producción de lodos en las estaciones depuradoras situadas en el archipiélago canario y se limitan al estudio realizado por el Instituto Tecnológico de Canarias (ITC): *“Diagnóstico de la producción y gestión de fangos de estaciones de tratamiento de aguas residuales urbanas y su aprovechamiento”* y a los datos presentados en el instrumento de planificación, control, coordinación y racionalización de todas las acciones relativas a los residuos importados, PIRCAN.

La tendencia de generación de lodos del archipiélago es alcista, llegándose en un futuro a la aproximación del límite de capacidad de tratamiento de las actuales instalaciones de depuración y/o regeneración de aguas. Por esto, además, se prevé un incremento en el número de EDAR o ampliación de las ya existentes, lo que se traducirá en un aumento de la producción de lodos (PIRCAN, 2021).

La generación de lodos en Canarias, de acuerdo al estudio elaborado por el Instituto Tecnológico de Canarias (ITC), se encuentra alrededor de las 18.000 a 20.000 toneladas de materia seca anual. Y se considera que estos datos se encuentran por debajo de la cifra real de producción.

El tratamiento y gestión llevada a cabo en la mayor parte de las EDAR situadas en Canarias someten a los lodos producidos a procesos de espesamiento y deshidratación, cuyo objetivo es el de obtener un material más seco de cara a tratamientos externos posteriores. La siguiente tabla muestra la producción de lodos entre los años 2008-2011 según los datos publicados por el ITC.

AÑOS	PRODUCCIÓN LODOS DE EDAR (t MATERIA SECA)
2008	11.544,1
2009	26.806,3
2010	19.446,8
2011	17.829,4

Tabla 19 Producción de lodos de EDAR en Canarias, 2013 (Fuente ITC)

En otro informe elaborado también por el Instituto Tecnológico de Canarias (ITC) titulado *“Desarrollo del Plan Estratégico del Sector de la Valorización energética de Residuos”* en 2013, se estima la producción de lodos en 30.000 toneladas de materia seca basándose en la tendencia de los datos de la tabla mostrada con anterioridad.

El tratamiento como el destino de los lodos varía en función de la isla, así:

- En Gran Canaria y Lanzarote, la mayor parte de los lodos producidos o casi su totalidad se valorizan en sus respectivos complejos ambientales mediante un proceso de digestión anaerobia con aprovechamiento energético del biogás producido. El fango posteriormente es vertido en depósitos controlados.
- En la Palma, los lodos que son entregados en el complejo ambiental se estabilizan biológicamente mediante su procesamiento en túneles herméticos, para su posterior vertido.
- En Tenerife, La Gomera y Fuerteventura, todos los lodos producidos se vierten en depósitos controlados.

De esto, se observa la necesidad de avanzar en cuanto a tratamiento de lodos en las estaciones depuradoras con el fin de reducir el vertido de lodos, especialmente en las islas donde se produce el vertido directo de los mismos sin tratamiento alguno.

En cuanto a la línea de tratamiento de lodos, los pasos habituales en el manejo y gestión de lodos producidos en las estaciones de depuración del archipiélago se pueden representar en dos diagramas en función del tamaño de la EDAR.

- Para plantas diseñadas para pequeñas poblaciones que tratan un caudal inferior a 300 m<sup>3</sup> al día, se procede con una línea como la que se muestra a continuación:

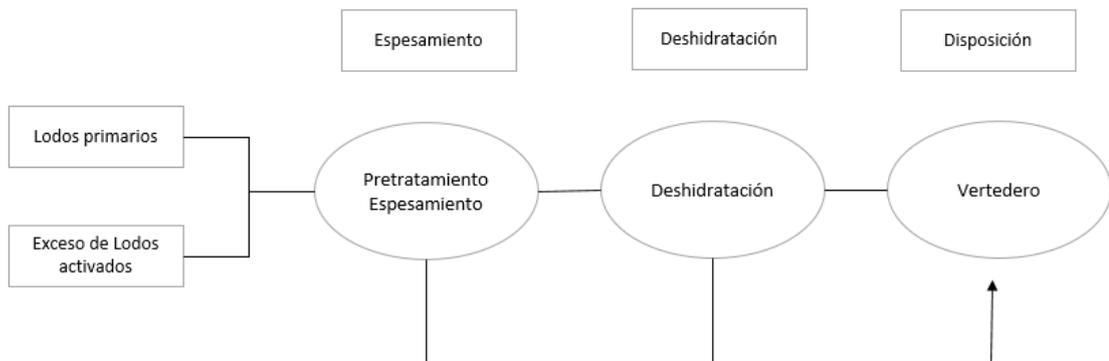


Figura 29 Línea de tratamiento de lodos para pequeñas EDAR en Canarias, 2013 (Fuente ITC)

- En plantas para mayor capacidad de tratamiento (>300m<sup>3</sup>/d de caudal de agua residual), y para grandes poblaciones, se le añade al esquema anterior una etapa de higienización de lodos quedando como se muestra a continuación:

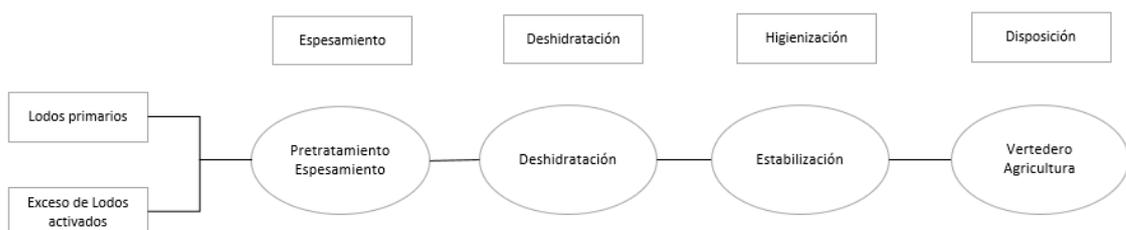


Figura 30 Línea de tratamiento de lodos para EDAR con mayor caudal en Canarias, 2013 (Fuente ITC)

En la siguiente tabla se muestran las tecnologías más habituales para los distintos tratamientos de lodos en las estaciones depuradoras del archipiélago:

Tratamiento	Tipos
<b>Espesamiento de los lodos:</b> Reducir el volumen de lodos líquidos que van a ser manipulados en los procesos posteriores	Espesamiento por gravedad y flotación
	Espesador laminar
	Espesador mecánico de tambor rotativo
<b>Deshidratación:</b> Extraer a los lodos tanta agua como sea posible con el fin de conseguir lodos con materias secas situadas en el rango de 18% y 35%.	Filtro banda
	Centrífuga
	Eras de secado
<b>Higienización-Estabilización:</b> Reducir la presencia de organismos patógenos, eliminar olores e inhibir o reducir el potencial de putrefacción.	Estabilización química
	Eras de secado
	Digestión aerobia y anaerobia
	Compostaje o estabilización biológica

*Tabla 20 Tecnologías habituales para distintos tratamientos de lodos en Canarias, 2013 (Fuente ITC)*

De forma general, los procedimientos de espesamiento y deshidratación se utilizan con el objetivo de adecuar el material a su destino final y estos son llevados a cabo en la misma EDAR donde es generado el lodo. Los procesos de higienización-estabilización, como la digestión anaerobia/aerobia o el compostaje se realizan desde hace relativamente poco tiempo en instalaciones externas como complejos ambientales.

Atendiendo a los avances tecnológicos actuales y siguiendo criterios de consumo energético y de químicos, además de la calidad de fango producto, se propone el siguiente tren de tratamiento:

1. Espesamiento por gravedad o flotación
2. Digestión anaerobia
3. Deshidratado centrífugo
4. Secado solar

## 6.2. Descripción de la instalación actual de la EDAR de Valle de Guerra

En este Trabajo Fin de Grado se ha evaluado la instalación de un sistema de reutilización de fangos para la agricultura en una de las depuradoras comarcales de la Isla de Tenerife, concretamente la EDAR de Valle de Guerra.

En la línea de tratamiento de lodos de la estación depuradora de Valle de Guerra se tratan los lodos o fangos producidos en el proceso de depuración biológica del agua residual. El proceso en la actualidad consta de dos etapas:

1. Espesamiento
2. Deshidratado

### 6.2.1. Espesamiento

El Sistema Comarcal de Saneamiento y Depuración del Noreste de Tenerife cuenta con un tipo de espesador denominado espesador por gravedad, el cual es de los más comunes en los procesos de espesamiento. Este presenta una geometría cilíndrica con un diámetro de 12 metros y con un fondo cónico. El espesador por gravedad se encuentra situado en el exterior del edificio de pretratamiento.



*Figura 31 Espesador por gravedad de EDAR de Valle de Guerra*

El funcionamiento de los espesadores por gravedad fue descrito en el apartado 3.1.2. El fango es alimentado a través de una cámara de alimentación central, éste espesa y compacta para retirarse posteriormente del fondo del tanque donde se bombea a tratamientos posteriores, mientras que el sobrenadante se recircula a la línea de tratamiento de aguas residuales. El lodo extraído del fondo del espesador se bombea mediante bombas de tornillo hasta las unidades de deshidratado de lodo. El sistema de bombeo de lodos se puede observar en la siguiente imagen.



*Figura 32 Sistema de bombeo de lodos espesado de EDAR de Valle de Guerra*

### 6.2.2. Deshidratado

El proceso de deshidratación que se lleva a cabo en el Sistema Comarcal de Saneamiento y Depuración del Noreste de Tenerife es el de deshidratado centrífugo.

Los lodos, antes de ser centrifugados, son previamente acondicionados con reactivos químicos cuya finalidad es la de conseguir una aglomeración de partículas en forma de flóculos para que la separación entre el lodo y el agua ocurra de forma rápida.

El acondicionamiento químico mencionado con anterioridad se lleva a cabo con polielectrolitos orgánicos, los cuales están formados por cadenas monomoleculares que producen una formación de puentes entre partículas debido a las largas cadenas ramificadas teniendo como consecuencia la floculación. Los polielectrolitos a menudo se suministran al lodo en forma de una solución acuosa diluida. En la siguiente imagen se puede observar el sistema de preparación del polielectrolito.



*Figura 33 Sistema de preparación de polielectrolito de EDAR de Valle de Guerra*

El sistema de preparación de polielectrolito consta de una tolva para el reactivo sólido (que se encuentra en forma de polvo), unos motores de agitación y un sistema que controla el agua empleada para elaborar la disolución coagulante.

El método de deshidratación por centrifugación está descrito con anterioridad en el apartado 5.1.1. Básicamente este proceso consta de un tambor cilíndrico-cónico que gira sobre un eje horizontal a una velocidad variable. El lodo se introduce dentro y debido a la fuerza centrífuga debido a la rotación del tambor, la parte más espesa es separada del líquido y ésta se retira a través de un tornillo helicoidal que gira a distinta velocidad que el tambor. La parte cilíndrica del tambor es la destinada a la sedimentación de las partículas sólidas, mientras que la cónica a la extracción de la parte líquida.

El líquido retirado es retornado al tratamiento secundario, biorreactor de membrana o MBR, presente en la estación depuradora.

El Sistema Comarcal de Saneamiento y Depuración del Noreste de Tenerife consta de dos líneas de tratamiento independientes de deshidratado donde se seca el fango procedente del proceso de espesamiento. En la siguiente imagen se observa el equipo de secado centrífugo del que consta la EDAR.



*Figura 34 Sistema de deshidratación centrifuga de EDAR del noreste de Tenerife*

Cada una de las unidades de centrifugación posee una bomba con una capacidad nominal de 18 m<sup>3</sup>/h. Y el lodo seco es impulsado a través de bombas de tornillo (con capacidad nominal de 1,9 m<sup>3</sup>/h) hasta el silo de fangos, que tiene como objetivo el almacenamiento del lodo ya deshidratado procedente de las centrifugas para su posterior retirada por una empresa dedicada a gestionar residuos peligrosos.

El silo de lodos adyacente en la estación depuradora del noreste de Tenerife consta de una capacidad máxima de 50 m<sup>3</sup>, y a su vez, está equipado con un sistema de apertura automático de la tolva, como se puede observar en la siguiente imagen.



*Figura 35 Silo de almacenamiento de lodos de EDAR del noreste de Tenerife*

### 6.3. Producción actual de fangos

El cálculo para la producción de lodos de la estación depuradora del noreste de Tenerife se realizó con datos obtenidos tanto del Pliego de Condiciones Técnicas del Consejo Insular de Aguas de Tenerife (CIATF) como de los documentos de características de aguas de entrada y producto correspondientes al expediente de la EDAR, obtenido de la página web del Ministerio de Hacienda y Función Pública. De esta información se obtuvo el caudal de entrada al tratamiento secundario (MBR) las demandas bioquímicas de oxígeno, tanto de la entrada como de la salida (DBO<sub>5e</sub> y DBO<sub>5s</sub>), y los sólidos suspendidos (S.S.) presentes a la entrada del reactor biológico.

Además, el caudal de salida de lodos del tratamiento secundario venia especificado en el plano del Anexo II de la página web del Ministerio de Hacienda y Función Pública. Estos datos son los que se muestran en la siguiente tabla.

Agua Entrada	
Q (m3/d)	7.000
DBO <sub>5e</sub> (ppm)	860
DBO <sub>5s</sub> (ppm)	3
S.S.e (ppm)	880

Tabla 21 Características del agua de entrada al tratamiento secundario

El primer paso para el cálculo de la materia seca que sale del tratamiento secundario es calcular la relación de sólidos suspendidos y la demanda bioquímica de oxígeno de entrada. Con la fórmula que se muestra a continuación:

$$r: \left( \frac{S.S.e}{DBO5_e} \right) = \frac{880}{860} = 1,0233$$

La relación de sólidos suspendidos y la demanda bioquímica de oxígeno permite calcular la tasa de producción de fangos mediante una ecuación semiempírica propuesta por Jorge Chamorro Alonso, ampliamente utilizada en los diseños preliminares de las estaciones depuradoras (iAgua, 2022).

$$\zeta \left( \frac{kg S.S.}{kg DBO5_{eliminada}} \right) = 0,55 + 0,675r - 0,007\theta(1 + r) = 1,1274$$

En la expresión anterior se introduce el término de edad de lodo o tiempo de retención celular ( $\theta$ ), que se define como el tiempo que pasa en el reactor una unidad de masa de microorganismo. Para el análisis propuesto, ya que se trata de un sistema con carga orgánica media y se busca una elevada reducción de DBO, se establece en 8 días (iAgua, 2022). La tasa de producción de fangos del sistema analizado es de 1,1274 kgSS/kgDBO<sub>5</sub> eliminada.

La producción de lodos secos obtenidos en el tratamiento secundario, se puede determinar mediante la siguiente expresión:

$$MSB \left( \frac{kg}{d} \right) = CM \frac{Q \left( \frac{m^3}{d} \right) (DBO5_e(ppm) - DBO5_s(ppm)) \zeta \left( \frac{kg}{kg} \right)}{1.000 \left( \frac{g}{kg} \right)} = 7.777 \frac{kg \text{ lodo seco}}{d}$$

Donde, el término CM representa un coeficiente de mayoración de diseño, que se ha establecido en 1,15 (iAgua, 2022). La siguiente figura se resumen los parámetros de diseño empleados.

<b><math>\theta</math> (días)</b>	8
<b>CM (Coeficiente de Mayoración)</b>	1,15

*Tabla 22 Parámetros referentes a la edad de lodos y el coeficiente de mayoración*

La producción de fangos secos del Sistema Comarcal del Noroeste de Tenerife se estima en 7.777 kg de lodo seco/d.

En el pliego de condiciones técnicas del Consejo Insular de Aguas de Tenerife (CIATF) se especifica que la sequedad final del lodo tras el proceso de centrifugado debe ser de un 23%. Como los procesos para el tratamiento del lodo se encargan de reducir el contenido en agua que estos presentan, se supone que los lodos secos que salen del reactor biológico son los lodos secos al final del proceso de deshidratado. Por lo que la producción de lodos de la EDAR de Valle de Guerra sería:

$$\text{Lodos producidos húmedos} \left( \frac{kg}{d} \right) = \frac{MSB \left( \frac{kg}{d} \right)}{\% \text{ sequedad}} = \frac{7.777}{0,23} = 33.816 \frac{kg \text{ lodos}}{d}$$

Se estima por tanto una producción de lodos húmedos de 33.816 kg/d.

#### 6.4. Propuesta de línea de tratamiento de fangos

Se propuso, para la nueva línea de tratamiento de lodos, añadir una serie de procesos para la adecuación de los fangos producidos en la estación depuradora del noreste de Tenerife con el fin de revalorizar estos residuos. Aprovechándolos en el sector agrario o simplemente para minimizar tanto coste como la huella de carbono generada por la planta.

Los procesos necesarios en una línea de tratamiento de fangos son el espesamiento, la estabilización y la deshidratación. La estación depuradora del noreste de Tenerife, como se ha comentado con anterioridad, cuenta en la actualidad con procesos de espesamiento y deshidratación. Por lo que se propone en la nueva línea de fangos propuesta, un proceso de estabilización para reducir el contenido en organismos patógenos, eliminar olores y reducir el potencial de putrefacción. Se toma la decisión de implementar un sistema de estabilización anaerobia debido a que presenta un buen grado de atenuación de los parámetros mencionados que se pretenden reducir y además con este proceso se pueden aprovechar los gases generados por la digestión para satisfacer las necesidades energéticas del propio proceso.

Por último, se propone un sistema de deshidratación solar, ya que con este tipo de procesos se puede conseguir un alto porcentaje de sequedad y porque el método de secado solar utiliza una fuente de energía limpia y renovable. Reducir lo máximo posible la cantidad de agua que contienen los lodos es importante tanto para el transporte, como para su vertido y para su reutilización.

### 6.5. Diseño preliminar de la línea de reutilización

El diseño preliminar para la línea de reutilización del fango consta de un digestor anaerobio situado entre los procesos de espesado y de deshidratación centrífuga. Y de un sistema de secado solar posterior al proceso de deshidratado centrífugo. Como se muestra en la siguiente imagen:

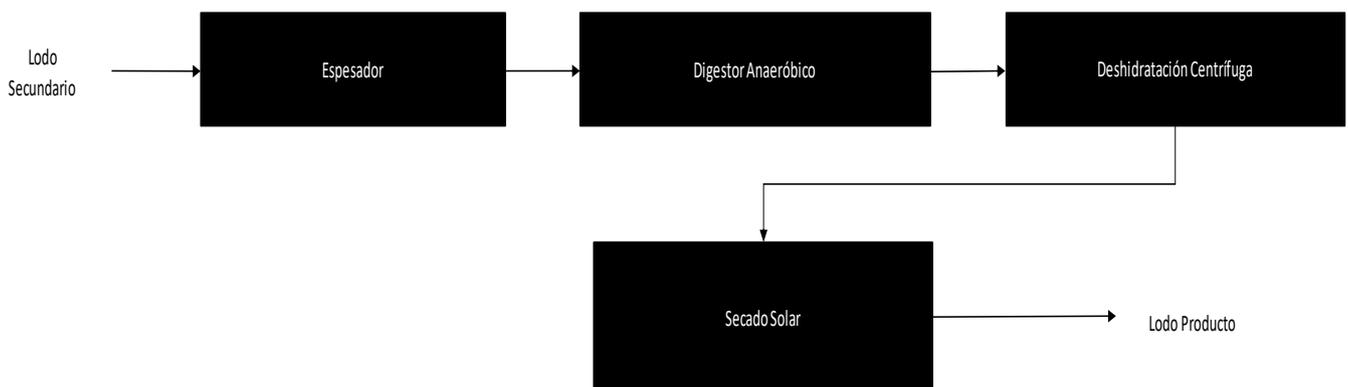


Figura 36 Diagrama del diseño preliminar de la línea de reutilización de fangos

### 6.5.1. Diseño del proceso de estabilización anaeróbica

Para el dimensionamiento del digestor anaerobio se necesita la edad de los lodos del reactor anaerobio y el caudal con el que se impulsan los lodos del anterior tratamiento (espesado). Los digestores anaerobios para la estabilización de fangos el tiempo de retención hidráulico y celular es el mismo, en el caso analizado se ha propuesto un valor de 8 días atendiendo a datos de referencia de la bibliografía (iAgua, 2022). En los planos del Anexo II de la página web del Ministerio de Hacienda y Función Pública se especifica que del espesador se impulsan los lodos con un caudal de 18 m<sup>3</sup>/h y que el sistema de impulsión consta de tres bombas con una configuración de 1+2, siendo dos equipos de bombeo sistemas de emergencia y reserva. Partiendo de los datos anteriores y asumiendo la definición de tiempo de retención hidráulico se puede determinar el volumen necesario del digestor anaerobio.

$$V (m^3) = 24 (h)Q \left( \frac{m^3}{h} \right) \theta (\text{días}) = 24(18)8 = 3.456 m^3$$

Jorge Chamorro Alonso (iAgua, 2022), propone la siguiente expresión para determinar el diámetro del digestor.

$$\varphi: \text{diametro} (m) = \left( \frac{4 V(m^3)}{\pi} \right)^{\frac{1}{3}} = 16,4 m$$

Se supone que la altura del digestor es igual al diámetro (iAgua, 2022), por lo que:

$$h (m): \text{Altura digestor} = \varphi: \text{diametro} (m) = 16,4 m$$

En condiciones normales del proceso de digestión se produce biogás que se pretende aprovechar mediante el uso de microturbinas para calentar el lodo durante el proceso de digestión anaeróbica. La producción óptima de biogás se puede establecer en 35 °C, teniendo en cuenta condiciones viables económicas y técnicas. El fango a la salida del espesador se encontrará a una temperatura que se puede suponer que es igual a la del agua tratada en la estación depuradora. Según el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE) la temperatura del agua se mantiene relativamente constante a lo largo de todo el año como se puede observar en la siguiente imagen. Para el diseño se asume que el fango se encontrará a la temperatura media de las temperaturas del agua de la red (17,3 °C).

Temperaturas del agua de la red 2010	
Mes	Temperatura
Enero	15
Febrero	15
Marzo	16
Abril	16
Mayo	17
Junio	18
Julio	20
Agosto	20
Septiembre	20
Octubre	18
Noviembre	17
Diciembre	16
<b>Media</b>	<b>17,3</b>

Tabla 23 Temperaturas del agua de la red de Tenerife, 2010 (Fuente IDAE)

Para calcular la producción de biogás en el digestor es necesario conocer la materia volátil de entrada y salida del mismo. Para esto se supone que el contenido en materia volátil de los fangos que entran al espesador corresponde a un 75% de los lodos secos y que el digestor presenta un porcentaje de reducción de materia volátil del 45% (iAgua, 2022).

$$MVB_e \left( \frac{kg}{d} \right) = MSB \left( \frac{kg}{d} \right) 0,75 = 5.833,3 \frac{kg}{d}$$

$$MVB_s \left( \frac{kg}{d} \right) = MVB_e \left( \frac{kg}{d} \right) (1 - 0,45) = 3.208,3 \frac{kg}{d}$$

La materia volátil abatida se puede determinar con la materia volátil de entrada y salida al digestor.

$$MV_a \left( \frac{kg}{d} \right) = MVB_e \left( \frac{kg}{d} \right) - MVB_s \left( \frac{kg}{d} \right) = 2.625 \frac{kg}{d}$$

El volumen de biogás producido se determina teniendo en cuenta el valor de la materia volátil abatida y el ratio de producción de biogás, que se estima en 900 litros de biogás por kilogramo de materia volátil abatida (iAgua, 2022).

$$V_{bio} \left( \frac{Nm^3}{d} \right) = \frac{MV_a \left( \frac{kg}{d} \right) R_{bio} \left( \frac{l}{kg MV_a} \right)}{1.000 \left( \frac{l}{Nm^3} \right)} = \frac{2.625 \cdot (900)}{1.000} = 2.362,5 \frac{Nm^3}{d}$$

Con el volumen de biogás producido en la digestión anaerobia se diseña tanto el gasómetro como el quemador en función a un tiempo mínimo de almacenamiento y un coeficiente punta respectivamente (iAgua, 2022).

<b>Ta (h)</b>	8
<b>Vg (m3)</b>	787,5

Tabla 24 Tiempo mínimo de almacenamiento y volumen del gasómetro

$$V_g(m^3) = \frac{V_{bio} \left( \frac{Nm^3}{d} \right) T_a(h)}{24 \left( \frac{h}{d} \right)} = 787,5 m^3$$

<b>Cp</b>	2
<b>Qq (Nm3/h)</b>	196,9

Tabla 25 Coeficiente punta y capacidad del quemador

$$Q_q \left( \frac{Nm^3}{h} \right) = \frac{V_{bio} \left( \frac{Nm^3}{d} \right) c_p}{24 \left( \frac{h}{d} \right)} = 196,87 \frac{Nm^3}{h}$$

Con el volumen del gasómetro calculado, se dimensiona éste a partir del catálogo de gasómetros de doble membrana de Sattler Group (DMGS). Se toma uno con una capacidad similar y en este ya vienen contemplada las medidas que debe tener como el diámetro y la altura.

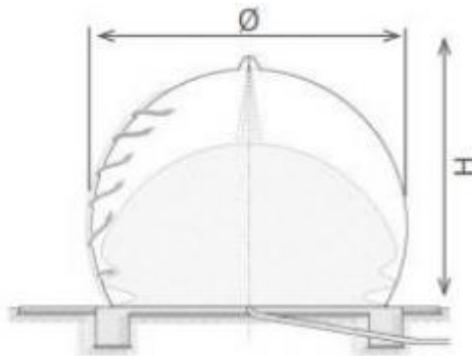


Figura 37 Gasómetro de doble membrana (Fuente catálogo Sattler Group)

tres cuartos de esfera			
designación del tipo	diámetro / altura		capacidad efectiva
	Ø	H	
BA100 108/205	5,0 m	3,8 m	53 m <sup>3</sup>
BA100 109/205	5,6 m	4,2 m	73 m <sup>3</sup>
BA100 110/205	6,2 m	4,7 m	104 m <sup>3</sup>
BA100 111/205	6,8 m	5,1 m	132 m <sup>3</sup>
BA100 112/205	7,4 m	5,6 m	174 m <sup>3</sup>
BA100 113/205	7,9 m	5,9 m	213 m <sup>3</sup>
BA100 114/205	8,6 m	6,5 m	275 m <sup>3</sup>
BA100 115/205	9,2 m	6,9 m	337 m <sup>3</sup>
BA100 116/205	9,8 m	7,4 m	408 m <sup>3</sup>
BA100 117/205	10,4 m	7,8 m	488 m <sup>3</sup>
BA100 118/205	11,0 m	8,3 m	578 m <sup>3</sup>
BA100 119/205	11,6 m	8,7 m	679 m <sup>3</sup>
BA100 116/250	12,2 m	9,1 m	791 m <sup>3</sup>
BA100 117/250	13,3 m	10,1 m	1.046 m <sup>3</sup>

Tabla 26 Dimensiones del gasómetro (Fuente catálogo Sattle Group)

Se pretende la instalación de un sistema de microturbinas que permita la producción eléctrica y además, permita obtener un calor residual para el calentamiento del fango contenido en el digestor. En función al volumen de biogás producido se seleccionará una o varias microturbinas acordes al parámetro de consumo de biogás de la unidad. Al ser el volumen de biogás de 98,44 Nm<sup>3</sup>/h, se seleccionaron tres turbinas modelo CAPSTONE CR 65 cuyo consumo de biogás es de 37,96 Nm<sup>3</sup>/h. En las siguientes figuras se presentan las características de las turbinas seleccionadas.

Microturbina CAPSTONE C65	
Rendimiento eléctrico	29 %
Poder calorífico inferior (PCI) Biogás disponible	21.266 KJ/Nm <sup>3</sup>
Consumo de biogás	37,96 Nm <sup>3</sup> /hr
Producción media de biogás	119,53 Nm <sup>3</sup> /hr

Tabla 27 Microturbina modelo CAPSTONE CR 65, 2010 (Fuente Sanmartín)

# Características

<b>Nominal:</b> 65 kW	<b>Servicio Eléctrico:</b> Trifásico, 4 Cables Wye	<b>Tasa de Calor Neto LHV:</b> 12.4 MJ/kWh (11,800 BTU/kWh)
<b>Eficiencia Eléctrica LHV:</b> 28%	<b>Anchura:</b> 0.76 m (30 in)	<b>Temperatura de Escape:</b> 309°C (588°F)
<b>Eficiencia Combinada de Calor y Energía:</b> Hasta 90%	<b>Profundidad:</b> 1.95 m (77 pulgadas)	<b>Flujo de Gases de Escape :</b> 0.49 kg/s (1.08 lbm/s)
<b>Voltaje:</b> 400-480 VAC	<b>Altura:</b> 1.91 m (75 pulgadas)	<b>Combustibles Compatibles :</b> Gas Natural, Combustibles Líquidos (Queroseno, Combustibles de Aviación, Diésel Ultra Bajo en Azufre n.º2), Biogás (Vertedero, Digestor), Gas Asociado, Gas Agrío, Gas Propano
<b>Frecuencia:</b> 50/60 Hz	<b>Peso:</b> Conexión a la Red: 758 kg (1,671 lb); Modo Dual: 1,121 kg (2,471 lb)	

*Figura 38 Características de microturbina modelo CAPSTONE CR65 (Fuente Micropower Europe)*

Con los datos mostrados en la tabla siguiente se pueden calcular las necesidades energéticas del fango para este ser calentado desde 17,3 a 35 °C y también el poder calorífico del biogás procedente de la microturbina para comprobar si aparte de generar energía se puede calentar la corriente de fangos.

<b>Cpf (kcal/kg°C)</b>	0,3585
<b>Tmf (°C)</b>	17,3
<b>Tdf (°C)</b>	35
<b>Qf(m3/h)</b>	18
<b>Densidad estimada lodo anaerobio (kg/m3)</b>	1.015

<b>Cpb (kcal/kg°C)</b>	0,3728
<b>Teb(°C)</b>	309
<b>Tsb(°C)</b>	100
<b>Qb(kg/s)</b>	0,49

*Tabla 28 Datos para el cálculo de la necesidad y poder calorífico del fango y biogás respectivamente*

Los calores específicos tanto del lodo como del biogás vienen especificados en la evaluación energética de la cogeneración mediante biogás procedente de la digestión anaerobia de fangos de una EDAR por García, J. (2019). La temperatura seleccionada de salida del biogás es una superior a la temperatura de rocío del biogás y es una temperatura orientativa para observar si se pueden cubrir las necesidades caloríficas del lodo.

Para el cálculo de las necesidades caloríficas del lodo:

$$N_f \left( \frac{kcal}{d} \right) = 24 \left( \frac{h}{d} \right) Q_f \left( \frac{m^3}{h} \right) (T_{d_f} (^{\circ}C) - T_{m_f} (^{\circ}C)) \rho \left( \frac{kg}{m^3} \right) c_p \left( \frac{kcal}{kg^{\circ}C} \right)$$

Y con respecto al cálculo del poder calorífico del biogás procedente de la microturbina:

$$P_{cb} \left( \frac{kcal}{d} \right) = 3 (Microturbinas) Q_b \left( \frac{kg}{s} \right) 86.400 \left( \frac{s}{d} \right) (T_{e_b} (^{\circ}C) - T_{s_b} (^{\circ}C)) c_p \left( \frac{kcal}{kg^{\circ}C} \right)$$

Nf (kcal/d)	2,78E+06	<<	Pcb (kcal/d)	9,90E+06
-------------	----------	----	--------------	----------

Tabla 29 Comparación de necesidades caloríficas del lodo y poder calorífico del biogás

Como se puede observar en la figura, el biogás que sale de microturbina es perfectamente capaz de calentar el fango a la entrada del digestor anaerobio con un sistema como podría ser el que se muestra a continuación.

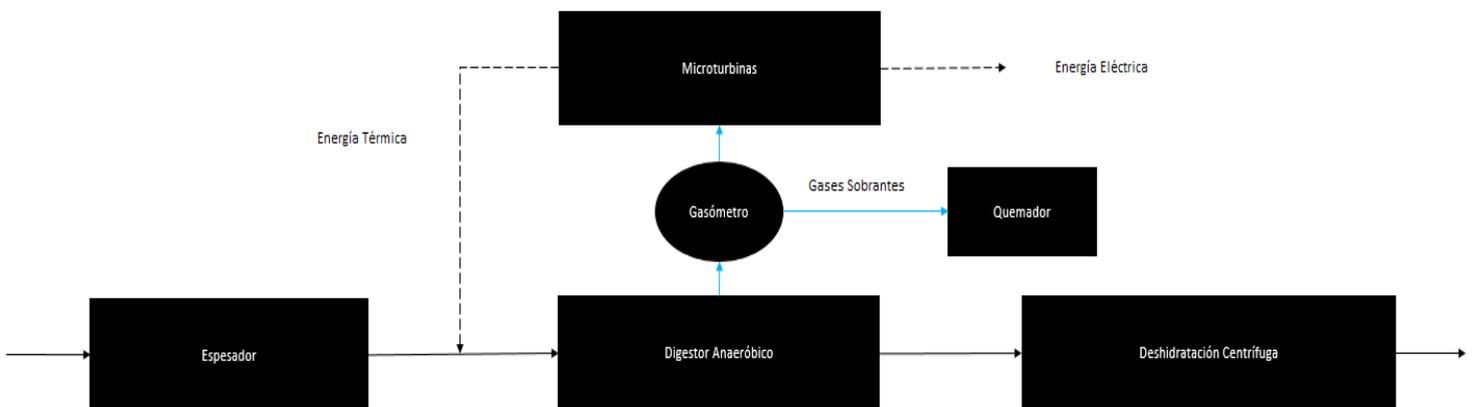


Figura 39 Digestión anaeróbica con cogeneración

Al implementar un sistema de estabilización anaerobio, el contenido de lodos a la salida de la unidad varía de la siguiente manera:

$$MSB' \left( \frac{kg}{d} \right) = MVB_s \left( \frac{kg}{d} \right) + \left( MSB \left( \frac{kg}{d} \right) - MVB_e \left( \frac{kg}{d} \right) \right) = 5.152,75 \frac{kg}{d}$$

Así que los lodos producidos antes del proceso de secado solar, teniendo en cuenta una humedad del 23%, serian ahora:

$$Lodos\ producidos \left( \frac{kg}{d} \right) = \frac{MSB' \left( \frac{kg}{d} \right)}{\% Humedad} = \frac{5152,75}{0,23} = 22.403,25 \frac{kg\ lodos}{d}$$

Por último, teniendo en cuenta las dimensiones del digestor y que el proceso se ubica después del sistema de espesamiento se considerada que la zona para su instalación es la que se muestra en la siguiente imagen:



Figura 40 Zona de instalación del digestor anaeróbico en la EDAR de Valle de Guerra

El sistema que se utilizaría para mover el lodo desde el espesador la zona de intercambiadores de calor es el mismo que se utilizaba con anterioridad para mover estos del proceso de espesamiento al sistema de deshidratación centrifuga. Posteriormente se utilizaría un sistema igual o similar para el movimiento del digestor a las centrifugas.

El gasómetro se ubicaría en el espacio sobrante junto al digestor anaerobio, tal y como se muestra en la imagen de a continuación:



*Figura 41 Ubicación del gasómetro en la EDAR del noreste de Tenerife*

De la misma manera las microturbinas y el sistema de intercambiador de calor estarían situados en un cuarto destinado únicamente para esos equipos. El cuarto se ubicaría entre el sistema de digestión anaeróbica y el gasómetro. Los gases procedentes del proceso de estabilización se enviarían al gasómetro y de ahí al cuarto donde se encuentran las microturbinas. El calor aprovechado del biogás, mediante una serie de intercambiadores, calentarían la corriente de lodos antes de la entrada de ésta al digestor.



Figura 42 Zona de microturbinas e intercambio de calor EDAR noreste de Tenerife

### 6.5.2. Diseño del proceso de secado solar

Sabiendo la cantidad de los lodos que salen del proceso de deshidratación centrífuga se puede dimensionar la unidad desecado solar en forma de “invernadero”. Tratando un porcentaje del 70% de la cantidad de lodos salidos del proceso anterior, debido a que si tomásemos el 100% de los lodos procedentes de la centrífuga y los tratásemos, el dimensionamiento del sistema de secado solar sería muy difícil de ubicar en la estación depuradora del noreste de Tenerife ya que se tendrían que abarcar una gran área.

Con una estimación de los días que tarda el proceso de deshidratación solar de 8 semanas, se puede calcular una estimación de los kg que deben depositarse en el “invernadero” (iAgu, 2022).

$$\begin{aligned}
 \text{kg de lodo a tratar (kg)} &= \text{Lodos producidos} \left( \frac{\text{kg}}{\text{d}} \right) 56 \text{ (días de tratamiento)} 0,7 \\
 &= 878.207\text{kg}
 \end{aligned}$$

La densidad del lodo permite determinar el volumen de fango seco a tratar y calcular el área del lecho de lodos sabiendo que la altura de estos debe ser de 30 cm, ya que el aplicar capas más gruesas hace que el secado de los lodos tarde más. Pescod (1971) realizó un estudio donde se aplicó una capa 10 cm superior y el tiempo de secado se llegó casi a duplicar para las mismas condiciones climáticas.

$$\text{Volumen de lodos (m}^3\text{)} = \text{kg lodo a tratar (kg)} \rho_{\text{lodo}} \left( \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) = 865 \text{ m}^3$$

$$\text{Area del lecho (m}^2\text{)} = \frac{\text{Volumen de lodos (m}^3\text{)}}{\text{Altura de lecho (m)}} = \frac{865}{0,3} = 2884 \text{ m}^2$$

Estableciendo que cada módulo de secado solar consta de unas dimensiones de 60x11, se puede saber cuántos módulos hacen falta para tratar el volumen de lodos.

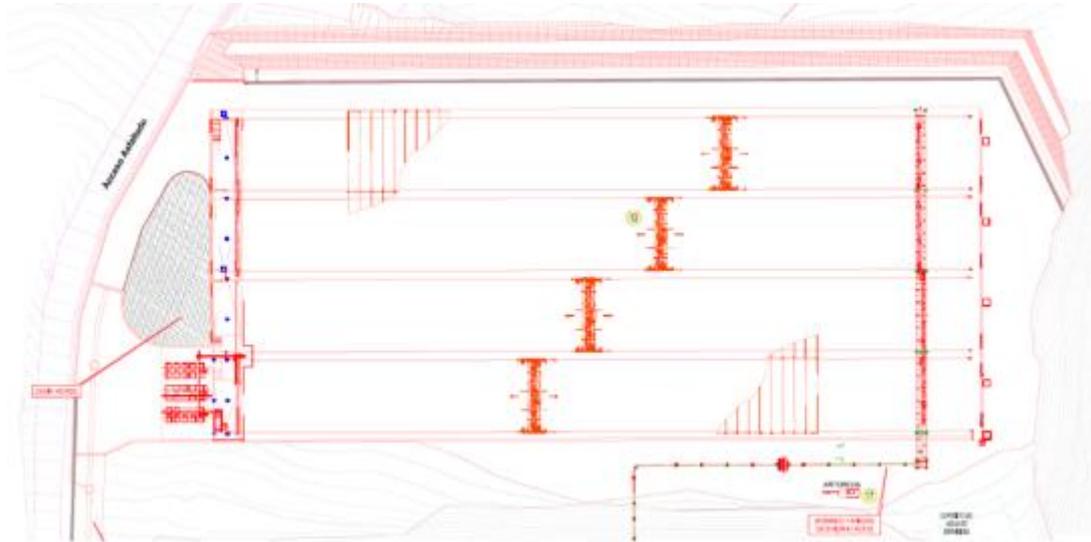
$$\text{Módulos Necesarios} = \frac{60(11) \text{ (m}^2\text{)}}{\text{Area del lecho (m}^2\text{)}} \approx 4 \text{ Módulos}$$

Conocidas las dimensiones y el número de módulos, se emplazan estos como se muestra en la imagen de a continuación:



*Figura 43 Zona propuesta para el emplazamiento del sistema de secado solar*

El diseño del sistema de secado solar sería similar al propuesto por Lapuerta, M. (2020) para el diseño de un sistema de secado solar en la estación depuradora de Adeje-Arona pero con distintas dimensiones para cada módulo. Este diseño se puede observar en la siguiente imagen:



*Figura 44 Sistema de secado solar propuesto, 2020 (Fuente Lapuerta)*

El fango a la salida del proceso de deshidratación centrífuga es vertido a una bomba con una capacidad nominal de 18 m<sup>3</sup>/h. Y el lodo ya seco es impulsado a través de bombas de tornillo (con capacidad nominal de 1,9 m<sup>3</sup>/h) hasta el sistema de secado solar en lugar de al silo de fangos como se hacía anteriormente.

El proceso de secado solar estará diseñado de forma automática para que no se requiera ningún tipo de supervisión ni intervención manual por parte de los trabajadores de la EDAR. El sistema contará desde la zona de carga con un puente escarificador de lodo el cual es el encargado de distribuir el lodo por la anchura del “invernadero” para que posteriormente este sea transportado de forma longitudinal.

La nave de secado contará con un sistema forzado de aire para regular el movimiento de este dentro del invernadero. Existirá una serie de ventanales abatibles en el tejado y de aberturas laterales para el fácil movimiento de aire, expulsando el aire ya húmedo para renovarlo a su vez por uno más seco y frío. El forzado de aireación interna se llevara a cabo con una serie de ventiladores para garantizar la suficiente distribución del aire para el incremento de la evaporación del agua adyacente en los lodos.

Un factor de suma importancia para el incremento del secado del fango es el volteo y labrado del mismo con el fin de provocar un mayor contacto de la capa más húmeda del lodo con el aire. El propio escarificador volteo y airea la capa de lodos para que mantenga unas condiciones aeróbicas reduciendo así la capacidad que tienen los fangos para generar malos olores.



Figura 45 Escarificador de lodo Wendewolf, 2022 (Fuente Wendewolf)

La principal fuente de energía empleada para este método de secado es la radiación solar. Por lo que se debe tener en cuenta esta y otros parámetros para asegurarse de que la instalación opera en las óptimas condiciones. Si se compara el parámetro de radiación solar que se puede encontrar en Europa, vemos que este oscila entre los 1.000 a 1.700 kWh/m<sup>2</sup>, mientras que en la zona de Valle de Guerra en Tenerife los valores de radiación solar tienen una media anual de 1.744 kWh/m<sup>2</sup> o 6.280 MJ/m<sup>2</sup> (Tabla 30). Esta comparación deja claro que en cuanto a radiación solar la zona en la que se pretende implantar el sistema de secado solar es adecuada (Cabello, 2013; Santana y col., 2020).

	PERIODO	ALTO	INVIE	PRIMA	VERAN	OTOÑO	ANUAL
		m	MJ/m <sup>2</sup>				
<b>COMARCA DE ACENTEJO</b>							
LAGUNA - TEJINA	2004 2019	90	1280	2049	1965	1140	6435
LA LAGUNA - VALLE GUERRA - PAJALILLOS	2004 2018	110	1261	1969	1901	1147	6280
SANTA ÚRSULA - EL MALPAÍS	2008 2019	205	1235	1892	1806	1092	6026
LAGUNA - PICO DE TEJINA	2004 2018	250	1277	1900	1918	1109	6206
LA LAGUNA - VALLE GUERRA - ISAMAR	2004 2018	293	1289	1944	1868	1160	6262
TEGUESTE - LA PADILLA	2004 2019	400	1193	1735	1759	1019	5708
LA LAGUNA - GARIMBA	2004 2018	493	1207	1719	1737	1128	5792
SANTA ÚRSULA - LAS TIERRAS	2008 2019	530	1106	1643	1629	979	5358
SANTA ÚRSULA - LA CORUJERA	2005 2019	550	1070	1523	1511	946	5053
TACORONTE - AGUA GARCÍA	2004 2019	640	1235	1810	1783	1072	5901
LA VICTORIA - EL LOMO	2005 2019	650	1077	1563	1604	945	5191
MATANZA - CRUZ DEL CAMINO	2005 2019	660	1164	1783	1863	1016	5826
EL SAUZAL - RAVELO	2004 2019	922	1174	1779	1914	1018	5887

Tabla 30 Radiaciones solares directas acumuladas y anuales, 2020 (Fuente Santana y col.)

Una de las características destacadas del método de deshidratación solar es que con un buen rendimiento se pueden llegar a obtener sequedades de hasta el 80%. Tomando como referencia un valor de referencia más real, suponiéndose que no se llega a un rendimiento óptimo (valor del 60% de sequedad), se calcula el nuevo volumen de lodos generados por la estación depuradora del noreste de Tenerife (Lapuerta, 2020).

$$\text{Entrada Lodo Seco } \left(\frac{\text{kg}}{\text{d}}\right) = \text{MSB}' \left(\frac{\text{kg}}{\text{d}}\right) 0,7 = 3.607 \frac{\text{kg}}{\text{d}}$$

$$\text{Entrada Lodo Humedad } \left(\frac{\text{kg}}{\text{d}}\right) = \text{Lodos producidos}_{\text{centrífuga}} \left(\frac{\text{kg}}{\text{d}}\right) 0,7 = 15.682 \frac{\text{kg}}{\text{d}}$$

$$\text{Salida Lodo Humedad } \left(\frac{\text{kg}}{\text{d}}\right) = \frac{\text{Entrada Lodo Seco } \left(\frac{\text{kg}}{\text{d}}\right)}{\% \text{Sequedad}'} = \frac{3607}{0,6} = 6.012 \frac{\text{kg}}{\text{d}}$$

$$\text{Lodos a Verter } \left(\frac{\text{kg}}{\text{d}}\right) = \text{Lodos producidos}_{\text{centrífuga}} \left(\frac{\text{kg}}{\text{d}}\right) 0,3 = 6.721 \frac{\text{kg}}{\text{d}}$$

La línea de tratamiento de lodos propuesta permite reducir de 33.816 kg/d a 6.721 kg/d de fango vertido, permitiendo obtener unos 6.012 kg/d de fango estabilizado y que puede ser reutilizado con fines agrícolas.

## 6.6. Viabilidad

La viabilidad de la línea de fangos propuesta se realizará atendiendo a tres criterios: reutilización del fango deshidratado, alineado con la legislación vigente en materia de residuos sólidos en España y la reducción de la Huella de Carbono.

En primer lugar se ha de hacer una comprobación de los parámetros de calidad del lodo producto de la EDAR del noreste de Tenerife para la nueva línea de tratamiento de lodos, pero como esto no es posible dado que no se dispone de una especie de planta piloto para llevar a cabo un experimento, las conclusiones se realizarán en base a resultados de la bibliografía sobre el uso de este tipo de sistemas de deshidratación como es el secado solar y los efectos que éste tiene en los parámetros relacionados con los organismos microbianos.

En el artículo realizado por Belloulid, M.O. y col. se recomienda el uso del método de deshidratación solar debido a los altos porcentajes de sequedad que los lodos pueden alcanzar. También observa el comportamiento de los organismos microbianos adyacente en el lodo cuando éste pasa por el proceso de secado. En el estudio se demuestra una mejora de la condición microbiana en lodos después de ser tratados con un secado solar, llegándose a la disminución de un orden de magnitud después de las 24 horas de tratamiento para coliformes fecales y pasadas las 72 horas, otra disminución para los organismos patógenos *Clostridium pefringens*, *Escherichia coli*, *Pseudomonas aeruginosa* y *Staphylococcus aureus*.

Con las conclusiones que se pueden extraer de este artículo, sumado a la no adición de ningún tipo de químico que pueda suponer un incremento en los parámetros de metales pesados del lodo, se supone que el lodo cumple con lo establecido en el Real Decreto 1310/1990, de 29 de octubre sobre el uso de lodo de depuradora en el sector agrario.

La reutilización de los lodos permite integrar en el proceso productivo un residuo alineando el proceso de depuración y/o regeneración de aguas residuales con la legislación vigente en España sobre residuos sólidos. Además el proceso permite reducir significativamente la masa de residuos producidos aplicando una la primera directriz fijada para la gestión de residuos de la legislación vigente.

Uno de los parámetros más relevantes a la hora de analizar cual puede llegar a ser el impacto medioambiental provocado por un sistema operativo, es la emisión de gases de efecto invernadero. Estos generan una problemática con respecto al incremento del calentamiento global, haciendo que el calor de la tierra vuelva a la propia atmosfera elevando su temperatura. Atendiendo a lo anterior, se debe realizar un estudio de viabilidad medioambiental, analizando la huella de carbono que genera la planta y comparándola con la huella de carbono que se generaría si se implanta en la estación depuradora el nuevo sistema de tratamiento de lodos, con el fin de ver si esta se reduce o aumenta. Este análisis se hará de forma cualitativa debido a la no existencia de la línea de tratamientos en la realidad, lo que supone la falta de datos para la comparación de viabilidad.

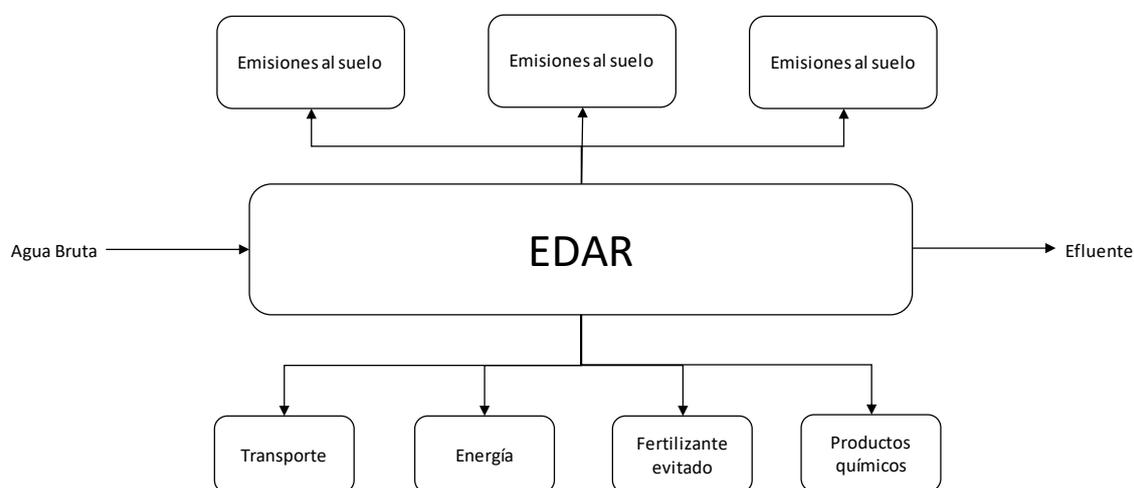


Figura 46 Generación de contaminación de una EDAR, 2022 (Fuente elaboración propia)

Como se puede observar en la figura anterior, las fuentes que generan un impacto en la huella de carbono y que para el caso de la EDAR del noreste de Tenerife, es de relevancia a la hora de comparar una línea de tratamiento con otra, son: el transporte, la energía y el fertilizante evitado. Como se observa en el artículo técnico de Blanco, D. y col. (2014), el impacto negativo más importante viene dado por las operaciones de la EDAR, seguido del consumo eléctrico y el transporte. Esto se observa en los datos obtenidos por el método Eco-indicator 99 (E) V2.05. donde se cuantifica el impacto de la estación depuradora estudiada en el artículo.

Sistema	EDAR (mPt)	Transporte lodos (mPt)	Fertilizante evitado (mPt)	Consumo eléctrico (mPt)	Total (mPt)
Combustibles fósiles	-	55,1	-99	76,8	33 (4%)
Respiratorios inorgánicos	0,198	18,6	-43,9	45,4	20 (3%)
Ecotoxicidad	673	2,52	-	2,44	678 (91%)
Cambio climático	20,4	5,62	-24,4	10,2	12 (2%)
<b>Total (mPt)</b>	<b>693 (93%)</b>	<b>82 (11%)</b>	<b>-167 (-22%)</b>	<b>135 (18%)</b>	<b>743</b>

Tabla 31 Impacto cuantificado según el método Eco-indicator 99 (E) V2.05, 2014 (Fuente Blanco, D. y col.)

El nuevo sistema de tratamiento de lodos planteado consigue dar valor fertilizante al fango tratado reduciendo el residuo generado por la estación depuradora a casi un 80% con respecto al sistema actual que presenta la estación depuradora del noreste de Tenerife. Por lo que, existe una disminución de la huella de carbono generada por la depuradora.

En cuanto al consumo eléctrico, con respecto al nuevo diseño de la línea de tratamiento de fangos, se han instalado una serie de microturbinas que generan electricidad a partir del biogás generado en el proceso de digestión anaeróbica. Esto hace que los propios procesos de la EDAR minimicen el consumo eléctrico haciendo que la planta se autoabastezca parcialmente a sí misma.

La huella de carbono que se ahorra al aplicar equipos de cogeneración como las microturbinas a la planta, se calcula en base a la producción eléctrica generada por las microturbinas y el ratio de emisión de CO<sub>2</sub> por megavatio hora. Este ratio se puede encontrar en el anuario energético de Canarias publicado por el instituto de estadística de Canarias (ISTAC), en la tabla que se muestra a continuación.

Año	Gran Canaria	Tenerife	Lanzarote	Fuerteventura	La Palma	La Gomera	El Hierro	Canarias
2011	0,756	0,801	0,683	0,754	0,689	0,698	0,712	0,764
2012	0,708	0,709	0,677	0,749	0,684	0,691	0,707	0,708
2013	0,680	0,685	0,663	0,725	0,683	0,698	0,710	0,684
2014	0,664	0,675	0,667	0,737	0,683	0,639	0,705	0,675
2015	0,671	0,685	0,616	0,742	0,682	0,689	0,951	0,678
2016	0,678	0,691	0,657	0,750	0,685	0,694	0,693	0,687
2017	0,686	0,696	0,662	0,773	0,676	0,691	0,698	0,694
2018	0,683	0,694	0,667	0,767	0,676	0,688	0,700	0,692
2019	0,680	0,697	0,664	0,756	0,676	0,683	0,682	0,691
2020	0,668	0,685	0,690	0,742	0,693	0,696	0,694	0,683

Tabla 32 Evolución del factor de emisión (tCO<sub>2</sub>eq/MWh) de cada isla, 2020 (Fuente ISTAC)

La producción eléctrica se multiplica por el factor de emisión de CO<sub>2</sub> y obteniendo como resultado la huella de carbono que se ahorra la estación depuradora del noreste de Tenerife al utilizar equipos de cogeneración en el proceso de digestión anaerobia.

$$\begin{aligned}
 & \text{Huella de Carbono Ahorrada} \left( \frac{tCO_2}{\text{año}} \right) \\
 &= \text{Producción Eléctrica} \left( \frac{MWh}{\text{año}} \right) \text{Factor Emisión} \left( \frac{tCO_2}{MWh} \right) \\
 & \text{Huella de Carbono Ahorrada} \left( \frac{tCO_2}{\text{año}} \right) = 0,685 \left( \frac{tCO_2}{MWh} \right) 1.708,2 \left( \frac{MWh}{\text{año}} \right) = 1.170 \frac{tCO_2}{\text{año}}
 \end{aligned}$$

Se puede observar que se ahorran unas 1.170 toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente al año. Y análogamente, se aprecia unos 1.708 MWh al año que se ahorra la planta. Teniendo en cuenta que el precio de la luz es de 459,4 euros por MWh.

$$\text{Dinero Ahorrado} \left( \frac{€}{\text{año}} \right) = 1.708 \left( \frac{MWh}{\text{año}} \right) 459,4 \left( \frac{€}{MWh} \right) = 784.655 \frac{€}{\text{año}}$$

La depuradora, con la nueva línea de tratamiento de fangos se ahorraría unos 784.655 euros anuales gracias a la aplicación de equipos de cogeneración.

Por otro lado, la energía empleada para el sistema de secado solar, proviene de una fuente limpia, renovable y no contaminante.

Atendiendo a la nueva cantidad de lodos cuyo destino es el vertido. Esta cantidad ya no es del 100% de los lodos que se generan en la estación depuradora del noreste de Tenerife. Al reducirse la cantidad de estos al 30% el transporte y post-tratamiento que requieren los fangos reducen su coste a la vez que la huella de carbono que este proceso genera. Esto se puede observar en la siguiente tabla donde se comparan las movilizaciones a la Planta Insular de Residuos Sólidos (PIRS) de los lodos producidos a verter de las diferentes líneas de tratamiento, la existente en la EDAR del noreste de Tenerife y la propuesta.

	Lodos Vert. 1	Lodos Vert. 2
Días recogida (días/año)	365	365
Cantidad recogida (kg/d)	34.000,00	7.000,00
Distancia (I/V) (km)	120	120
Tiempo engancho (h)	0,40	0,40
Tiempo transporte (h)	2,00	2,00
Tiempo descarga (h)	0,50	0,50
Tiempo descanso (h)	0,20	0,20
Tiempo Total Viaje (h)	3,10	3,10
Velocidad media (km/h)	60	60
Consumo (L/h)	22,80	17,40
Uso Combustible (L/año)	25.798,20	19.688,10
Emisiones CO <sub>2</sub> (kgCO <sub>2</sub> /L)	2,52	2,52
Precio Combustible (€/L)	1,52	1,52
Coste Anual (€/año)	39.084,27	29.827,47
Ahorro Combustible (€/año)	0	9.256,80
Huella de Carbono (kgCO <sub>2</sub> /año)	65.011,46	49.614,01

*Tabla 33 Comparación del transporte de lodos a verter para las distintas líneas de tratamiento, 2022 (Fuente elaboración propia)*

Como se puede observar en la tabla, existe un ahorro económico debido a que el consumo de transportar menos cantidad de lodos es menor. Y por otro lado, la huella de carbono es menor por parte de la línea de tratamiento propuesta con respecto a la ya existente.

Y en el caso de no poderse aprovechar el 70% de lodos restantes que han sido tratados para su reutilización, al reducir el volumen de los lodos en aproximadamente un 60%, el coste y la huella de carbono generada por la movilización de los lodos hasta su gestión se reduce dado que se requerirá de menos carga en los vehículos de transporte. Si esta cantidad de lodos es revalorizada, utilizándose como fertilizante en la zona de Valle de Guerra (zona con una importante demanda agrícola), se modificarían las rutas de transporte a fincas y cultivos cercanos haciendo que, de nuevo, se reduzca el coste de movilización, la huella de carbono y exista algún tipo de incentivo económico al venderse el lodo como fertilizante.

## 7. Conclusiones

- Ante la creciente producción de lodos que proceden de depuradores de aguas residuales, tanto urbanas como industriales, es de suma importancia el hecho de reutilizar toda esta cantidad de materia orgánica que puede servir de forma fertilizante en la actividad agraria. Este método de reutilización es el más adecuado frente a otros debido a que es beneficioso de forma ambiental como para el ámbito agrario porque permite eliminar estos residuos sin alterar el equilibrio ecológico.
- Para el tratamiento de lodos procedentes de una EDAR de aguas residuales domésticas se propone una línea de tratamiento compuesta por: espesador, digester anaerobio, centrifugación y secado solar. La selección de procesos se realiza atendiendo a los rendimientos alcanzados de cada una de las unidades.
- El diseño de la planta se adapta correctamente para el caudal a tratar y para la disponibilidad de espacio de la estación depuradora. La línea de tratamiento permite reducir la cantidad de lodos vertidos de 33.816 kg/d a 6.721 kg/d, contemplándose una reutilización de los fangos deshidratado en las eras de secado de 6.012 kg/d.
- Se podría mejorar el tratamiento al tratar el 100% de los lodos producidos para no verter nada y aprovechar todo el residuo con el fin de destinarlo al sector agrario de la zona. Sin embargo, los requerimientos de espacio son demasiado amplios.
- La huella de carbono generada en la planta se reduce considerablemente debido a factores como la reducción del volumen de los lodos, gracias al proceso de secado solar, que hace que el impacto negativo del transporte se vea mermado aparte de que es un proceso “limpio” ya que utiliza energía renovable. También el consumo eléctrico es minimizado por el uso de equipos de cogeneración que aprovechan los gases generados de la digestión anaerobia para producir energía la cual satisface las necesidades del propio proceso de estabilización. Se ha estimado que la huella de carbono se reduce en 49.614 kgCO<sub>2</sub>/d debido al transporte y se ahorra en 1.170 tCO<sub>2</sub>/año.

## 8. Conclusions

- Given the increasing production of sludge from wastewater treatment plants, both urban and industrial, it is of utmost importance to reuse all this amount of organic matter that can be used as fertilizer in agriculture. This method of reuse is the most appropriate compared to others because it is beneficial both environmentally and for the agricultural sector because it allows the elimination of these wastes without altering the ecological balance.
- For the treatment of sludge from a domestic wastewater treatment plant, a treatment line is proposed consisting of: thickener, anaerobic digester, centrifugation and solar drying. The selection of processes is made according to the performance achieved by each of the units.
- The design of the plant is correctly adapted to the flow to be treated and to the availability of space in the treatment plant. The treatment line makes it possible to reduce the amount of sludge discharged from 33,816 kg/d to 6,721 kg/d, with a reuse of 6,012 kg/d of dehydrated sludge in the drying beds.
- Treatment could be improved by treating 100% of the sludge produced so as not to dump anything and to use all the waste for the agricultural sector in the area. However, the space requirements are too large.
- The carbon footprint generated in the plant is considerably reduced due to factors such as the reduction of the sludge volume, thanks to the solar drying process, which reduces the negative impact of transportation, as well as being a "clean" process since it uses renewable energy. Electricity consumption is also minimized by the use of cogeneration equipment that uses the gases generated from anaerobic digestion to produce energy to meet the needs of the stabilization process itself. It has been estimated that the carbon footprint is reduced by 49,614 kgCO<sub>2</sub>/d due to transportation and 1,170 tCO<sub>2</sub>/year is saved.

## 9. Referencias

- Aldavero, R. (2019). *Valorización de lodos de depuradora mediante incineración en horno de lecho fluidizado*. Universidad de Oviedo.
- Belloulid, M. O., Hamdi, H., & Mandi, L. (2017). Solar Greenhouse Drying of Wastewater Sludges Under Arid Climate. *Waste Biomass*, 8, 193-202.
- Beltrán, E. M., Imperial, R. M., Porcel, M. Á., Martín, J. V., Beringola, M. L., Calvo, R., & Delgado, M. (2005). Influencia de la fertilización con lodos de depuradora compostados en las propiedades químicas del suelo de dos olivares. *Revista Internacional de Contaminación*, 21(3), 143-150.
- Blanco, D., Collado, S., Díaz, M., Suarez, M. P., Pérez, J. A., & Sánchez, J. (2014). Análisis de la huella de carbono en una planta de tratamiento de agua tipo carrusel. *TECNOAQUA*, 52-58.
- Cabello, A. (2013). *Análisis de la influencia ambiental de las diferentes tecnologías fotovoltaicas*. Universidad de Sevilla.
- CAPSTONE. (s. f.). Micropower Europe. Recuperado 11 de septiembre de 2022, de <https://www.micropowereurope.com/es+>
- Caracterización de los lodos de depuradoras generados en España*. (2009). MARM. [https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/publicaciones/lodos\\_depuradoras\\_tcm30-185077.pdf](https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/publicaciones/lodos_depuradoras_tcm30-185077.pdf)
- Catálogo de depósitos de biogás*. (2021). SATTLER GROUP. <https://ceno.sattler.com/es/home>
- Chamorro, J. (2016, septiembre 12). *Depuración para principiantes VI-2: Datos de diseño de la línea de fangos. Balance de masas*. iAgua. <https://www.iagua.es/blogs/jorge-chamorro/depuracion-principiantes-vi-2-datos-diseno-linea-fangos-balance-masas>
- Cuevas, J., Seguel, O., Ellies Sch, A., & Dorner, J. (2006). Efectos de las enmiendas orgánicas sobre las propiedades físicas del suelo con especial referencias a la adición de lodos urbanos. *Revista de la Ciencia del Suelo y Nutrición Vegetal*, 6(2), 1-12.
- Delgado, M. M., Martín, J. V., Rodríguez, C., & Imperial, R. M. (2012). Evaluación de un lodo secado térmicamente en la fertilización de cultivo de cereal. *Revista de la Asociación Interprofesional para el Desarrollo Agrario*, 3, 357-375.
- Destino de los lodos generados por comunidades y ciudades autónomas, tipo de destino y periodo*. (2018). INE. <https://www.ine.es/jaxi/Tabla.htm?path=/t26/p067/p01/serie/10/&file=01008.px&L=0>
- Diagnóstico de la producción y gestión de fangos de estación de tratamiento de aguas residuales urbanas y su aprovechamiento. (2013). *Instituto Tecnológico de Canarias (ITC)*.

- Díaz Ibarra, M. A., Muy Rangel, M. D., Rubio Carrasco, W., & Armendáriz Alcaraz, O. (2010). Aplicación de lodos de procesos de potabilización como mitigantes de la sodicidad en suelos agrícolas. *Ingeniería*, 14(2), 87-97.
- Espesamiento de Lodos. (2020, septiembre 17). American Water Chemicals, Inc. <https://www.membranechemicals.com/es/water-treatment/espesamiento-de-lodos/>
- Estación Depuradora del Noreste Tenerife (Valle de Guerra) [Agricultura Gobierno de Canarias]. (2017, noviembre 27). Youtube. <https://www.youtube.com/watch?v=IGlgUH0GB6w>
- Expediente 2018/225. (2018). Ministerio de Hacienda y Función Pública. [https://contrataciondelestado.es/wps/portal/!ut/p/b0/04\\_Sj9CPyKssy0xPLMnMz0vMAfljU1JTC3ly87KtUIJLEnNyUuNzMpMzSxKTgQr0w\\_Wj9KMyU1zLcvQjld3DPEtykz1CyrRzC40MSysykhLDAm1t9Qtycx0BMPZ\\_bw!!/](https://contrataciondelestado.es/wps/portal/!ut/p/b0/04_Sj9CPyKssy0xPLMnMz0vMAfljU1JTC3ly87KtUIJLEnNyUuNzMpMzSxKTgQr0w_Wj9KMyU1zLcvQjld3DPEtykz1CyrRzC40MSysykhLDAm1t9Qtycx0BMPZ_bw!!/)
- Filtros de Banda. Serie euopress. (s. f.). Alfa Laval. Recuperado 11 de septiembre de 2022, de <https://docplayer.es/27278887-Filtros-de-banda-serie-euopress.html>
- Galeano, L. J., & Rojas, D. (2016). *Propuesta de diseño de una planta de tratamiento de agua residual por zanjón de oxidación para el casco urbano del municipio de Vélez*. Universidad Católica de Colombia.
- García, J. (2019). Evaluación energética de la cogeneración mediante biogás procedente de la digestión anaerobia de fangos de una EDAR. *Revista Profesional, Técnica y Cultural de los Ingenieros Técnicos de Minas*, 15, 28-51.
- Giménez, P. J. (2010). *Efectos sobre el sistema suelo-planta de compost de lodo anaerobio*. Universidad Politécnica de Cartagena.
- Gondim-Porto, C. (2013). *Análisis microbiológico de un suelo agrícola mediterráneo tras la aplicación de lodos de depuradora urbana*. Universidad Complutense de Madrid.
- González, I. C. (2015). *Generación, caracterización y tratamiento de lodos de EDAR*. Universidad de Córdoba.
- Guerrero, C., Mataiz-Solera, J., Navarro-Pedreño, J., García-Orenes, F., & Gómez, I. (2001). Different patterns of aggregate stability in burned and restored soils. *Arid Land*, 15(2), 163-171.
- Guía técnica de agua caliente sanitaria central. (2010). Idae. [https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos\\_08\\_Guia\\_tecnica\\_agua\\_caliente\\_sanitaria\\_central\\_906c75b2.pdf](https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_08_Guia_tecnica_agua_caliente_sanitaria_central_906c75b2.pdf)
- Irañeta, J., Amorena, A., & Blázquez, S. (2013). Uso de lodos de depuradora como fertilizantes. *Revista Agropecuaria y Ganadería*, 965, 572-579.
- ISTAC: Estadísticas de la Comunidad Autónoma de Canarias. (2020). Gobierno de Canarias. <http://www.gobiernodecanarias.org/istac/jaxi-istac/menu.do?uripub=urn:uuid:131cf873-66a9-408d-8cfa-537d6be05067>
- Lapuerta, M. (2020). *Secado solar de lodos de depuradora para el ahorro energético en los procesos de post-tratamiento*. Universidad Politécnica de Madrid.

- Largo, C., & Romero, D. A. (2018). *Determinación de los coeficientes cinéticos para el diseño de lagunas de estabilización en la industria alimentaria, caso productos Ramo S. A.* Universidad de Colombia.
- Lax, A., Roig, A., & Costa, F. (1983). A method for determining the cation-exchange capacity of organic materials. *Plant and Soil*, 94(3), 349-355.
- Lloret, E., Pascual, J. A., Brodie, E. L., Bouskill, N. J., Insam, H., Fernández-Delgado, M., & Goberna, M. (2016). Sewage sludge addition modifies soil microbial communities and plant performance depending on the sludge stabilization process. *Applied Soil Ecology*, 101, 37-46.
- Macedo, J. R., Pires, L. F., Reichardt, K., Dornelas, M., Bacchi, O. S. S., & Menequelli, N. A. (2002). Organic residual management and soil physical properties. *17th World Congress of Soil Science*, 14-21.
- Mendoza, F. (2019). *Ahorro y eficiencia energética en instalaciones medioambientales.* Universidad de Sevilla.
- Metcalf and Eddy Inc. (1991). *Wastewater engineering: Treatment, disposal and reuse* (G. Tchobanoglous & F. Burton, Eds.; 3.ª ed.). McGraw-Hill Education (ISE Editions).
- Murcia, F. J. (2014). *Una visión integral para su posible aplicación a suelos desde una perspectiva agrícola.* Universidad de Murcia.
- Pérez, A. (2016). *Estudio bibliográfico del uso de lodos de depuradora en suelos agrícolas.* Universidad Politécnica de Valencia.
- Pescod, M. B. (1971). Sludge handling and disposal in tropical developing countries. *Journal of Water Pollution and Control*, 43(4), 555-570.
- Pliego de Condiciones Técnicas del Consejo Insular de Aguas de Tenerife. (2018). CIATF.
- Polo, M. J., Giráldez, J. V., & Ordóñez, R. (1997). *Uso Agrícola de Lodos de Depuradora. Aplicación de los lodos producidos en la E.D.A.R. de Córdoba a la rotación trigo-girasol.* Junta de Andalucía.  
<https://www.juntadeandalucia.es/servicios/publicaciones/detalle/44219.html>
- Programa de Prevención y Plan de Gestión de Residuos. (2021). *Plan Integral de Residuos de Canarias (PIRCAN).*
- Propiedades Químicas.* (s. f.). FAO. Recuperado 11 de septiembre de 2022, de <https://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/clasificacion-de-suelos/sistemas-numericos/propiedades-quimicas/es/>
- Recogida y tratamiento de las aguas residuales por comunidades y ciudades autónomas, tipo de indicador y periodo.* (2018). INE.  
<https://www.ine.es/jaxi/Tabla.htm?path=/t26/p067/p01/serie/l0/&file=01005.px&L=0>
- Rucks, L., García, F., Kaplán, A., León, J., & Hill, M. (2004). *Propiedades físicas del suelo.* Universidad de la República.

- Sanmartín, E. (2010). *Simulación de una cogeneración basada en microturbinas de biogás en una EDAR urbana*. Universidad Politécnica de Cartagena.
- Santana, L. M. & Delgado, A. (2020). La radiación solar en Tenerife. *Museos de Tenerife Naturaleza y Arqueología (MUNA)*.
- SEFAR-Filtración – *Productos para filtro de tambor rotatorio*. (s. f.). Recuperado 11 de septiembre de 2022, de <https://www.sefar.es/es/609/Filtraci%C3%B3n-de-Proceso/Qu%C3%ADmicos/Filtros-de-tambor-rotatorio/Filtro-de-tambor-rotatorio.htm?Folder=6923454>
- Sobrados, L. (s. f.). *Producción y características DE Los fangos*. CEDEX. Recuperado 11 de septiembre de 2022, de <https://docplayer.es/40208252-Produccion-y-caracteristicas-de-los-fangos.html>
- Solar sewage sludge drying with the WendeWolf* -. (2022, septiembre 12). Wendewolf. <http://www.wendewolf.com/klswolf.php?lang=en>
- Solia Mix, el secado solar de lodos*. (2016). Interempresas. <https://www.interempresas.net/Agua/Articulos/158557-Solia-Mix-el-secado-solar-de-lodos-de-ultima-generacion-de-Veolia-Water-Technologies.html>
- Soon, Y. K. (1981). Solubility and sorption of cadmium in soils amended with sewage sludge. *Journal of Soil Scien*, 32(1), 85-95.
- Tratamiento de Aguas Residuales*. (2010). Belzona. [https://www.belzona.com/es/solution\\_maps/wastewater/money\\_map.pdf](https://www.belzona.com/es/solution_maps/wastewater/money_map.pdf)
- Tratamiento Primario*. (2017). Ozoniq. <https://ozoniq.webnode.mx/primario/>
- Universidad Miguel Hernández de Elche, & Ángeles, M. (2016, mayo 25). *UTILIZACIÓN DE COMPOST DE LODO EN AGRICULTURA*. Youtube. <https://www.youtube.com/watch?v=KKEheVjoDR0>
- Vico, A., Roig, A., & Costa, F. (2015). *Reciclaje de lodos de depuradora: Estudio del efecto del agente estructurante usado y de la proporción de lodo*. Escuela Politécnica Superior de Orihuela.