



**Universidad
Zaragoza**

Trabajo Fin de Grado

Valoración de los procesos de deshidratación de
lodos de depuradora

Assessment of sewage sludge's dehydration
processes

Autor

Víctor Rivera Tena

Director

Alejandro J. Acero Oliete y Francisco J. Lorén Zaragoza

Escuela Universitaria Politécnica La Almunia
2016



**ESCUELA UNIVERSITARIA POLITÉCNICA
DE LA ALMUNIA DE DOÑA GODINA (ZARAGOZA)**

MEMORIA

Valoración de los procesos de
deshidratación de lodos de depuradora

Assessment of sewage sludge's
dehydration processes

423.16.37

Autor: Víctor Rivera Tena

Director: Alejandro J. Acero Oliete y Francisco J. Lorén Zaragoza

Fecha: Diciembre 2016

INDICE DE CONTENIDO

INDICE DE CONTENIDO	I
INDICE DE ILUSTRACIONES	IV
INDICE DE TABLAS	V
1. RESUMEN	1
2. ABSTRACT	2
3. INTRODUCCIÓN	3
4. OBJETO	5
5. TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES	6
5.1. INTRODUCCIÓN	6
5.2. COMPOSICIÓN DEL AGUA RESIDUAL URBANA	7
5.2.1. <i>Parámetros de contaminación</i>	9
5.2.1.1. Sólidos en el agua	9
5.2.1.2. Microorganismos	9
5.2.1.3. Materias oxidables biológicamente	10
5.2.1.4. Oxígeno disuelto	11
5.2.1.5. Ciclo del nitrógeno	12
5.2.1.6. Fósforo total	12
5.2.1.7. pH	13
5.2.1.8. Cloruros	13
5.2.1.9. Grasas	13
5.2.2. <i>Caracterización de las aguas residuales urbanas</i>	14
5.2.2.1. Aguas blancas	14
5.2.2.2. Aguas negras	15
5.3. ESTACIONES DEPURADORAS DE AGUAS RESIDUALES	16
5.3.1. <i>Procesos unitarios de una E.D.A.R.</i>	18
5.3.2. <i>Esquema general de una estación depuradora de aguas residuales</i>	19
5.3.2.1. Línea de agua	21
5.3.2.1.1. Elementos iniciales de la E.D.A.R.	21
5.3.2.1.2. Pretratamiento	22
5.3.2.1.3. Tratamiento primario	23
5.3.2.1.4. Tratamiento secundario	23

INDICES

5.3.2.1.5.	Tratamiento terciario	25
5.3.2.2.	Línea de lodo	34
5.3.2.2.1.	Espesamiento	35
5.3.2.2.2.	Estabilización	39
5.3.2.2.3.	Acondicionamiento	42
5.3.2.2.4.	Deshidratación	43
5.3.2.2.5.	Destino final de los lodos	47
6.	LODOS DE DEPURADORA	49
6.1.	COMPOSICIÓN GENERAL DE LOS LODOS RESIDUALES URBANOS	50
6.1.1.1.	Propiedades de los lodos secos	52
6.2.	PRODUCCIÓN DE LODOS	53
6.2.1.	<i>Aragón</i>	53
6.2.2.	<i>España</i>	55
6.2.3.	<i>Unión Europea</i>	57
7.	MARCO JURÍDICO DE LOS LODOS DE DEPURADORA	63
7.1.	LEGISLACIÓN EUROPEA	63
7.2.	LEGISLACIÓN ESPAÑOLA	64
8.	INVESTIGACIÓN SOBRE LOS PROCESOS DE DESHIDRATACIÓN DE FANGOS DE LAS E.D.A.R.	65
8.1.	DESHIDRATACIÓN NATURAL	65
8.1.1.	<i>Humedales artificiales</i>	65
8.1.1.1.	Estructura del humedal artificial	67
8.1.1.2.	Ventajas e inconvenientes de los humedales artificiales	68
8.1.2.	<i>Sacos filtrantes</i>	69
8.1.2.1.	Etapas de la deshidratación por medio de sacos filtrantes	70
8.1.2.2.	Ventajas e inconvenientes de los sacos filtrantes	71
8.1.3.	<i>Geotubos</i>	71
8.1.3.1.	Funcionamiento del geotubo	72
8.1.3.2.	Ventajas e inconvenientes del geotubo	72
8.1.4.	<i>Secado solar</i>	73
8.1.4.1.	Era de secado	73
8.1.4.1.1.	Funcionamiento de una era de secado	74
8.1.4.1.2.	Ventajas e inconvenientes de una era de secado	74
8.1.4.2.	Secado solar mediante invernaderos	75
8.1.4.2.1.	Huber SRT	75
8.1.4.2.2.	Solia Mix	76
8.1.4.2.3.	Heliantis	76

8.2.	DESHIDRATACIÓN MECÁNICA	78
8.2.1.	<i>Centrífugas</i>	78
8.2.1.1.	Etapas de la deshidratación con centrífugas	78
8.2.1.2.	Parámetros de diseño	79
8.2.1.3.	Ventajas e inconvenientes de las centrífugas	79
8.2.2.	<i>Filtros banda</i>	80
8.2.2.1.	Etapas de la deshidratación con filtros banda	80
8.2.2.2.	Parámetros de diseño	81
8.2.2.3.	Ventajas e inconvenientes de los filtros banda	81
8.2.3.	<i>Filtros prensa</i>	82
8.2.3.1.	Elementos de un filtro prensa	82
8.2.3.2.	Etapas de la deshidratación con filtros prensa	83
8.2.3.3.	Parámetros de diseño	84
8.2.3.4.	Ventajas e inconvenientes de los filtros prensa	84
8.2.4.	<i>Filtros rotativos de vacío</i>	85
8.2.4.1.	Funcionamiento de un filtro rotativo de vacío	85
8.2.4.2.	Etapas de la deshidratación con filtros rotativos de vacío	85
8.2.4.3.	Ventajas e inconvenientes de los filtros rotativos de vacío	86
8.2.5.	<i>Tornillos deshidratadores</i>	86
8.2.5.1.	Funcionamiento de un tornillo deshidratador	86
8.2.5.2.	Ventajas e inconvenientes de los tornillos deshidratadores	87
9.	ESTUDIO ECONÓMICO DE LOS PROCESOS DE DESHIDRATACIÓN UTILIZADOS EN LAS ESTACIONES DEPURADORAS	88
9.1.	BASES DEL ESTUDIO ECONÓMICO	88
9.1.1.	<i>Conjuntos de estudio</i>	88
9.1.2.	<i>Maquinaria</i>	91
9.1.2.1.	Maquinaria existente en las depuradoras	91
9.1.2.1.1.	Depuradoras del Conjunto de Estudio 1	91
9.1.2.1.2.	Depuradoras del Conjunto de Estudio 2	92
9.1.2.2.	Selección de la maquinaria para el estudio	93
9.1.2.2.1.	Procesos de deshidratación a estudiar	93
9.1.2.2.2.	Empresas fabricantes	93
9.1.2.2.3.	Modelos de los equipos	96
9.1.3.	<i>Lodos</i>	96
9.1.4.	<i>Estimación de los costes de explotación</i>	97
9.1.5.	<i>Amortización</i>	98
9.2.	RESULTADOS	99
9.2.1.	<i>Conjunto de Estudio 1</i>	99

INDICES

9.2.2. Conjunto de Estudio 2	102
10. CONCLUSIONES	103
11. BIBLIOGRAFÍA	105

INDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Esquema de una E.D.A.R. convencional	20
Ilustración 2: Estratificación de un digester anaerobio	40
Ilustración 3: Digester de alta carga (Cardoso Vigueros, Lina & Ramirez González, Antonio, s. f.)	41
Ilustración 4: Corte de una era de secado (Jairo Alberto Romero Rojas, 1999)	44
Ilustración 5: Esquema de una E.D.A.R.	45
Ilustración 6: Filtro banda (Acero Oliete, Alejandro Jesús & Lorén Zaragozano, Francisco Javier, 2014)	46
Ilustración 7: Funcionamiento de un filtro prensa	47
Ilustración 8: Esquema de la generación y tratamiento de los lodos (Mnisterio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2016)	49
Ilustración 9: Sección de humedal artificial (Enrica Uggetti, 2011)	68
Ilustración 10: Bastidor de llenado de sacos filtrantes	70
Ilustración 11: Características de los geotubos de DLC	72
Ilustración 12: Vista general de un invernadero Huber SRT con el flujo de aire y del lodo (Huber Technology España, 2016)	75
Ilustración 13: Diagrama de proceso de Heliantis (Suez Environnement, 2016)	78
Ilustración 14: Sección de una centrífuga (Alfa Laval, 2015)	79
Ilustración 15: Esquema de flujo de un filtro banda (FRC Systems International, 2015)	81
Ilustración 16: Filtro prensa (Toro Equipment, 2015)	82

Ilustración 17: Funcionamiento de un filtro prensa (1 - Cierre del filtro prensa; 2 - Llenado; 3 - Filtración; 4 - Apertura)	83
Ilustración 18: Filtro rotativo de vacío	85
Ilustración 19: Tornillo deshidratador (Ernesto Herrera Díaz, 2016)	87

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Valores medios de contaminación de las aguas blancas (Hernández Muñoz, Aurelio, Hernández Lehmann, Aurelio, & Galán Martínez, Pedro, 2004).....	15
Tabla 2: Características de las aguas negras (Hernández Muñoz, Aurelio et al., 2004).....	16
Tabla 3: Diferentes procesos unitarios por líneas (Hernández Muñoz, Aurelio et al., 2004)	20
Tabla 4: Rendimiento de depuración en la línea de agua. (Hernández Lehmann, Aurelio, 2015).....	21
Tabla 5: Contaminantes sobre los que actúan los sistemas del tratamiento terciario (Fuentes Díaz, Manuel, s. f.).....	26
Tabla 6: Eficiencia de los sistemas terciarios para la eliminación de contaminantes (I) (Fuentes Díaz, Manuel, s. f.)	30
Tabla 7: Eficiencia de los sistemas terciarios para la eliminación de contaminantes (II) (Fuentes Díaz, Manuel, s. f.).....	30
Tabla 8: Operaciones y tipos de tratamientos de la línea de lodos (Murcia Navarro, Francisco José, 2013)	35
Tabla 9: Métodos de espesamiento para lodos residuales (Cardoso Vigueros, Lina & Ramirez González, Antonio, s. f.).....	36
Tabla 10: Composición química y propiedades de lodos sin tratar y digeridos (Cardoso Vigueros, Lina & Ramirez González, Antonio, s. f.)	51
Tabla 11: Concentración de metales pesados en lodos de una planta de tratamiento de aguas residuales	52

INDICES

Tabla 12: Propiedades físicas de los lodos secos	53
Tabla 13: Propiedades químicas de los lodos secos	53
Tabla 14: Métodos de depuración de las E.D.A.R. de Aragón (Gobierno de Aragón, 2016a, 2016b)	54
Tabla 15: Producción anual de lodos de depuradora de Aragón y España	55
Tabla 16: Destino de los lodos de depuradora de España	56
Tabla 17: Destino de lodos de E.D.A.R. en las Comunidades Autónomas y Ciudades Autónomas en el año 2012.....	56
Tabla 18: Producción anual de lodos de depuradora	58
Tabla 19: Lodos de depuradora destinados a uso en agricultura	59
Tabla 20: Lodos de depuradora destinados a uso como compost u otras aplicaciones	60
Tabla 21: Lodos de depuradora destinados a vertedero	61
Tabla 22: Lodos de depuradora destinados a incineración	62
Tabla 23: Tabla de comparación entre STRB y sistema de deshidratación mecánico (ARM Limited, 2016).....	66
Tabla 24: Depuradoras del Conjunto de Estudio 1	89
Tabla 25: Depuradoras del Conjunto de Estudio 2	90
Tabla 26: Maquinaria de las depuradoras del Conjunto de Estudio 1	91
Tabla 27: Maquinaria de las depuradoras del Conjunto de Estudio 2.....	92
Tabla 28: Modelos de equipos deshidratadores a analizar en el estudio	96
Tabla 29: Vida útil de la maquinaria.....	99
Tabla 30: Consumo diario de los equipos de deshidratación instalados en depuradoras	101
Tabla 31: Capacidad de una depuradora en función del volumen de lodo a deshidratar	104

1. RESUMEN

El presente proyecto analiza los procesos de deshidratación de lodos de estaciones depuradoras de aguas residuales urbanas. Los lodos procedentes de aguas industriales, además de la propia deshidratación, necesitan distintos procesos de desinfección o neutralización de agentes químicos que varían mucho de una industria a otra, por lo que este proyecto no entra a estudiarlos.

Inicialmente se expone la composición del agua residual urbana y la configuración de una Estación Depuradora de Aguas Residuales (E.D.A.R.), explicando las dos líneas que la componen (línea de aguas y línea de lodos) y los procesos unitarios de cada una de ellas. Tras ello, se enuncian las propiedades de los lodos de depuradora y se estudia su producción en Aragón, España y la Unión Europea.

Posteriormente se presentan los resultados de la investigación sobre los procesos de deshidratación de lodos de las depuradoras urbanas. En esta investigación se explican las estructuras, las fases, las ventajas y las desventajas de los distintos procesos, tanto naturales como mecánicos, de deshidratación de lodos.

Por último, se realiza un estudio económico y de rendimiento de los equipos de deshidratación de lodos de depuradoras. Este estudio analiza dos conjuntos de depuradoras, el primero de ellos está formado por las depuradoras de las capitales de provincia de mayor número de habitantes y el segundo está compuesto por las depuradoras de Aragón que trataron aguas con una media de carga contaminante máxima mensual superior a 2000 habitantes equivalentes en el año 2015. La finalidad de este estudio es determinar cuál es el equipo de deshidratación más ventajoso, tanto económicamente como por rendimiento, para cada uno de los conjuntos de estudio.

Palabras clave:

Lodo de depuradora, deshidratación de lodo, centrífuga, filtro banda y filtro prensa.

2. ABSTRACT

This project analyses the sludge's dehydration processes from urban wastewater treatment plants. The sludge's industrial water requires different processes of disinfection or neutralization of chemical agents that change widely from one industry to another, so this project does not go to study them.

Initially, the composition of urban wastewater and the configuration of a Wastewater Treatment Plant (WWTP) are exposed, explaining the two lines that compose it (water line and sludge line) and the unit processes of each one. After that, the properties of the sewage sludge are described and its production is studied in Aragón, Spain and the European Union.

Subsequently the results of the research on the sludge's processes of dewatering from WWTP are presented. This research explains the structures, phases, advantages and disadvantages of the different processes, both natural and mechanical, of sludge dehydration.

Finally, an economic and performance study of the dewatering equipment of sewage sludge is carried out. This study analyses two groups of sewage treatment plants, the first of which consists of sewage treatment plants in the provincial capitals with the largest number of inhabitants and the second is made up of Aragón's treatment plants which treated water with a mean maximum pollutant load higher than 2000 equivalent inhabitants by the year 2015. The purpose of this study is to determine the most advantageous dehydration equipment, both economically and by performance, for each of the study groups.

Key words:

Sewage sludge, sludge's dehydration, decanter, belt filter and filter press.

3. INTRODUCCIÓN

El hombre siempre ha producido residuos como consecuencia de su actividad, pero es a partir del desarrollo de la sociedad industrial y del crecimiento demográfico del último siglo cuando se produce un incremento significativo en la producción de los estos desechos, lo cual implica una serie de problemas de gestión, sanitarios y medioambientales. En las modernas sociedades urbanas de los países desarrollados, la correcta utilización de los recursos naturales y el aprovechamiento de los desechos que la propia sociedad genera son un requisito indispensable para el mantenimiento de la calidad de vida de sus ciudadanos y la protección del medio ambiente. (Murcia Navarro, Francisco José, 2013)

La ley 22/2011 de 28 de julio de residuos y suelos contaminados, los define como "cualquier sustancia u objeto que su poseedor deseché o tenga la intención o la obligación de desechar". En la actualidad existe una amplia tipología de ellos y, también, una gran variedad de clasificaciones que tratan de establecer un orden en todas estas tipologías, a tendiendo a distintos criterios (su naturaleza, su peligrosidad, su origen, etc.). La clasificación de éstos establecida por la legislación, tanto nacional como europea, responde a un análisis de los diferentes parámetros cuya observación es fundamental para una correcta gestión de los mismos.

De todos los tipos de residuos que se generan hoy en día, los de origen orgánico (de naturaleza urbana, agrícola o animal) son importantes por su cantidad. Su vertido incontrolado originaría un grave problema de contaminación, pero la ciencia y la tecnología han permitido que muchos de éstos sean valorizables una vez sean tratados de forma adecuada:

- Como aportes orgánicos para suelos, constituyendo estrategias para evitar su degradación y desertificación.
- Como fuente de energía, mediante su biometanización y conversión en metano.
- Extrayendo de ellos productos con valor añadido (aminoácidos a partir de residuos cárnicos o antioxidantes a partir de residuos agrarios).

En el contexto de los desechos orgánicos, hay que prestar especial atención a aquellos que se producen en las ciudades (residuos urbanos, tanto domiciliarios como lodos producidos en las estaciones depuradoras de aguas residuales, lodos de

Introducción

E.D.A.R.). Si no se hiciese nada con ellos, su volumen no tardaría en “asfixiar” a dichas ciudades.

En las E.D.A.R. se reproducen e intensifican de manera artificial y controlada, en poco espacio y breve tiempo, los mecanismos de autodepuración natural del río o del mar. Debido al propio funcionamiento de las depuradoras se obtiene cierta cantidad de lodos que debe ser gestionada correctamente.

Los lodos son un residuo orgánico que se genera en los procesos de tratamiento de depuración de aguas residuales. Tal y como se ha señalado, dichos lodos están incrementando su volumen debido a la necesidad de depurar nuestras aguas para reutilizarlas cuando sea posible. La composición de estos lodos, aunque es variable en función de la población origen de las aguas residuales, permite darles una solución de valorización. Debido a que son una fuente de materia orgánica y de elementos fertilizantes, una de las actividades más importantes que permite su utilización es la actividad agraria.

Previamente a su utilización, los lodos han de sufrir una serie de tratamientos que permiten, ente otras cosas, disminuir su volumen extrayendo parte del agua que contienen. Esta disminución de volumen aumenta la concentración del lodo, facilita su almacenado y abarata los costes del transporte. La presente memoria se centra en el estudio de uno de estos tratamientos que sufre el lodo, la deshidratación.

4. OBJETO

La deshidratación de los fangos de una E.D.A.R. es un proceso físico, integrado en la línea de fangos de dichas instalaciones, mediante el cual se reduce el volumen de estos extrayendo una mayor o menor cantidad del agua que contienen.

Esta etapa tiene gran importancia ya que un fango deshidratado tiene un manejo más sencillo y su transporte, hasta un posible uso posterior o a su destino final, es más cómodo y económico. Además, ante posibles usos de los fangos como combustible también es una operación necesaria porque aumenta su poder calorífico.

Tras lo indicado anteriormente, el presente proyecto tiene dos objetivos:

- Objeto descriptivo (estado del arte): realizar una investigación sobre los procesos de deshidratación de fangos más habituales de las E.D.A.R. En esta investigación, se enumerarán los diferentes sistemas de cada uno de los procesos de deshidratación de fangos, con sus ventajas y desventajas. Por otra parte, se elaborará un listado de la maquinaria utilizada en los distintos procesos. Por último, se estudiarán los distintos problemas o inconvenientes para la población que pueden llegar a ser originados por cada proceso de deshidratación.
- Objetivo cuantitativo: efectuar una valoración económica y de rendimiento de los procesos utilizados en las estaciones depuradoras de las capitales de provincia con más población de España, con la finalidad de describir el proceso de deshidratación que resulte más ventajoso tanto económicamente como por rendimiento. Esta valoración abarcará los siguientes puntos de estudio:
 - Inversión económica inicial necesaria en maquinaria para la realización del proceso.
 - Estimación de los costes de explotación del proceso de deshidratación.
 - Estimación del rendimiento de proceso de deshidratación del fango, en función del porcentaje de sequedad de la torta de fango tras someterse al proceso.
 - Comparación entre los diversos procesos estudiados para obtener los resultados.

5. TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

5.1. INTRODUCCIÓN

Los métodos de tratamiento de aguas residuales empezaron a desarrollarse por razones de salubridad e higiene pública y para evitar las condiciones adversas provocadas por la descarga de agua residual al medio natural. Con el progresivo crecimiento de las ciudades, se puso de manifiesto la limitada disponibilidad de terreno para el tratamiento y evacuación de las aguas residuales mediante riego e infiltración intermitente, métodos comunes a principios del siglo XX.

El objetivo del tratamiento en estaciones depuradoras es acelerar los procesos naturales de depuración, bajo condiciones controladas, en instalaciones de tratamiento de tamaño comparativamente menor.

En general, los objetivos que se plantearon hasta 1970 estaban relacionados con la eliminación de la materia en suspensión y de los materiales flotantes, el tratamiento de la materia biodegradable y la eliminación de los elementos patógenos. Estos objetivos estaban más relacionados con criterios estéticos que medioambientales. A mediados de los años 70, los objetivos de reducción de la Demanda Biológica de Oxígeno (DBO), los sólidos en suspensión y patógenos se mantuvieron y, además, se empezó a tener en consideración la eliminación de nutrientes como el nitrógeno y el fósforo, especialmente en cursos de aguas interiores y lagos debido a una mejor comprensión de los impactos ambientales producidos por los vertidos de aguas residuales, el conocimiento cada vez más profundo de los efectos a largo plazo (causados por la descarga al medio natural, de algunos de los constituyentes específicos del agua residual) y la concienciación de la necesidad de preservar el medioambiente.

A partir de 1980, como consecuencia de los avances científicos, el tratamiento de las aguas residuales incorporó nuevos objetivos relacionados con problemas de salud, en especial atención a la descarga de productos tóxicos o potencialmente tóxicos al medioambiente que podrían ser responsables de problemas sanitarios a largo plazo. (Murcia Navarro, Francisco José, 2013)

5.2. COMPOSICIÓN DEL AGUA RESIDUAL URBANA

El hombre ha utilizado las aguas para su consumo y, con el paso del tiempo, también para su actividad y para su confort, convirtiendo las aguas usadas en vehículo de desechos. De aquí surge la denominación de aguas residuales.

La contaminación de las aguas es uno de los factores importantes que rompe la armonía entre el hombre y su medio tanto a corto, como a medio y largo plazo. Por lo que, la prevención y la lucha contra ella constituyen una necesidad de importancia prioritaria en la actualidad.

Existen distintas clasificaciones de las aguas residuales, una de las más utilizadas por su simplicidad, es la que las identifica por su procedencia:

- Drenaje
- Escorrentía
- Domésticas
 - Fecales
 - Limpieza
- Industriales
 - Comerciales
 - Industriales
- Agrarias
 - Agrícolas
 - Ganaderas

En base al esquema anterior, las aguas contaminadas se clasifican en:

- Aguas pluviales: son las aguas de la escorrentía superficial provocada por las precipitaciones atmosféricas (lluvia, nieve, granizo, etc.). Se caracterizan por grandes aportaciones intermitentes de caudal, y por una contaminación importante en los primeros 15-30 minutos. Las cargas contaminantes se incorporan al agua al atravesar la atmósfera y por el lavado de superficies y terrenos.
- Aguas blancas: son aguas procedentes de la escorrentía superficial y de drenajes. Se caracterizan también por grandes aportaciones intermitentes

Tratamiento de aguas residuales

y su contaminación, además de su importancia en los primeros 15-30 minutos de las escorrentías, está igualmente determinada por la aportada con los caudales drenados (aguas salobres, filtraciones de alcantarillado, etc.).

- Aguas negras: son aguas recogidas en las aglomeraciones urbanas procedentes de los vertidos de la actividad humana doméstica, o a la mezcla de éstas con las procedentes de actividades comerciales, industriales y agrarias integradas en dicha aglomeración, y con las de drenaje y escorrentía de dicho núcleo. Sus volúmenes son menores que los de las aguas blancas y sus caudales y contaminación mucho más residuales.
- Aguas industriales: aguas procedentes de actividades industriales (precipitación de materias primas, elaboración y acabado de productos, así como la transmisión de calor y frío).

Con independencia del posible contenido de sustancias similares a los vertidos de origen doméstico, pueden aparecer en las aguas industriales elementos propios de cada actividad industrial, entre los que pueden citarse: tóxicos, iones metálicos, productos químicos, hidrocarburos, detergentes, pesticidas, productos radioactivos, etc.

- Aguas agrícolas: son aguas procedentes de actividades agrícolas y ganaderas. La contaminación de las aguas agrarias es muy importante, perjudicando sensiblemente las características del agua o medio receptor.

Al igual que las aguas industriales, las agrarias, además del contenido en sustancias similares a los vertidos de origen doméstico, pueden contener elementos propios de las actividades agrarias: fertilizantes, biocidas, estiércol residuos varios, etc. Respecto a los fertilizantes, es importante destacar que antes eran de origen orgánico pero, actualmente, han sido sustituidos, casi en su totalidad, por abonos de origen inorgánico (sulfatos, nitratos, fosfatos, etc.) que tienen especial incidencia en la contaminación de las aguas.

5.2.1. *Parámetros de contaminación*

5.2.1.1. *Sólidos en el agua*

El contenido total de materia sólida contenida en el agua constituye los Sólidos Totales (ST), comprendiendo los sólidos tanto orgánicos como inorgánicos. Su valor queda definido por toda la materia que permanece como residuo de evaporación a 105° C. Estos Sólidos Totales pueden encontrarse como:

- Sólidos Disueltos (SD): no sedimentan y se encuentran en el agua en estado iónico o molecular.
- Sólidos en Suspensión (SS):
 - Sedimentables (SSs): por su peso, pueden sedimentar fácilmente en un determinado tiempo (2 horas en cono Imhoff).
 - No sedimentables (SSn): no sedimentan fácilmente por su peso específico próximo al del líquido o por encontrarse en estado coloidal.

Los sólidos en suspensión sedimentables constituyen una medida de la cantidad de fango que se depositará durante el proceso de decantación en las depuradoras.

Cada una de las clases de sólidos descritas anteriormente puede clasificarse de nuevo en base a su volatilidad a 500°C. La fracción orgánica se oxidará y será expulsada como gas, permaneciendo la fracción inorgánica como ceniza. Por tanto, los términos de Volátiles y Fijos aplicados a todos los sólidos antes descritos (ST, SD, SS, SSs y SSn), hacen referencia a su parte orgánica e inorgánica, respectivamente.

5.2.1.2. *Microorganismos*

En el agua, hay incorporados multitud de microorganismos, entre los que pueden citarse: virus, algas, protozoos, bacterias, hongos, insectos, etc.

Los microorganismos presentes en el agua pueden clasificarse de varias formas:

- Según su "modo" de vida:
 - Parásitos: microorganismos que viven a expensas de otro ser vivo, pudiendo ser benignos o patógenos. Estos últimos pueden ser causantes de enfermedades que afectan directamente al hombre (hepatitis, fiebres tíficas, cólera, disentería...).

Tratamiento de aguas residuales

- Saprofitos: viven de la materia orgánica muerta, descomponiéndola para alimentarse. De su actividad metabólica se origina nueva materia viva.
- Según la posibilidad que tienen los microorganismos para la captación de oxígeno (como elemento básico energético de su vida):
 - Aerobios: captan de forma directa el oxígeno disuelto en el agua.
 - Anaerobios: obtienen el oxígeno por descomposición de la materia orgánica constituida por tres o más elementos (C, H, O, N, S, P o K).
 - Facultativos: pueden adaptarse a las condiciones aerobias o anaerobias, dependiendo de la existencia o no de oxígeno en las aguas.

5.2.1.3. Materias oxidables biológicamente

Se definen como materias oxidables biológicamente a aquellas que absorben de forma natural, hasta su mineralización, una cierta cantidad de oxígeno debido a los procesos químicos y biológicos de oxidación que se producen en el seno del agua. El índice para medir este fenómeno puede efectuarse mediante el análisis de parámetros tales como:

- Demanda Bioquímica de oxígeno (DBO)

La DBO es la cantidad de oxígeno disuelto consumida por un agua residual durante la oxidación «por vía biológica» de la materia orgánica biodegradable presente en dicha agua residual, en unas determinadas condiciones de en sayo (20°C, presión atmosférica, oscuridad y muestra diluida con agua pura manteniendo condiciones aerobias durante la prueba) en un tiempo dado.

Refleja la materia orgánica que existe en el agua, indicando el oxígeno necesario para alimentar a los microorganismos y las reacciones químicas.

La primera etapa de la oxidación biológica de la materia orgánica, en la que se produce la descomposición de los compuestos del carbono, se inicia inmediatamente y, con una temperatura de 20°C, concluye aproximadamente a los 20 días. La segunda etapa, en la que se produce la descomposición de los compuestos nitrogenados, se inicia al cabo de unos días (con 20°C a los 10-15 días).

Para el control de la autodepuración natural o para el control de los procesos de depuración suele adoptarse como parámetro de medida la demanda bioquímica de oxígeno a los cinco días y a 20°C (DBO5), cuyo valor se aproxima suficientemente al valor asintótico de la DBO correspondiente al ciclo del carbono.

Por ello, ante la necesidad de varios días de espera para conocer su resultado, se hace necesario adoptar otros métodos, que si bien no reflejan exactamente la realidad del hecho en la naturaleza permiten usarse, por su rapidez de determinación, para el control de vertidos y de los procesos de depuración.

- Demanda Química de Oxígeno (DQO)

La DQO es la cantidad de oxígeno disuelto consumida por un agua residual durante la oxidación «por vía química» provocada por un agente químico fuertemente oxidante.

Su determinación es más rápida que la correspondiente a la DBO, precisando su ensayo 1 o 2 horas si la oxidación se efectúa en frío, o bien 20 o 30 minutos si la oxidación se efectúa con dicromato en caliente.

La oxidación es activa sobre sales minerales oxidables, así como sobre la materia orgánica biodegradable, que existe en el agua analizada. El agua con la sustancia oxidante, como puede ser el dicromato potásico, y a pH determinado se calienta para facilitar la oxidación, y luego se determina la cantidad de oxígeno desaparecido.

Esta determinación depende del reactivo oxidante y de las materias que se puedan oxidar de naturaleza orgánica e inorgánica que existen en el agua.

5.2.1.4. Oxígeno disuelto

Siendo la fuente energética de los seres vivos el oxígeno, éste se convierte en índice fundamental para la definición y control de las aguas residuales.

- La cantidad de oxígeno en el agua puede ser incrementada por:
- Captación del oxígeno a través de la superficie de interfase agua-aire.
- Acción fotosintética, debida principalmente a las algas verdes.
- Descenso de la temperatura.
- Dilución.

La cantidad de oxígeno puede disminuir por la respiración de los microorganismos, algas y organismos macroscópicos, elevación de la temperatura, reacciones químicas y por la acción metabólica de los microorganismos regidos por la acción enzimática.

5.2.1.5. Ciclo del nitrógeno

En su variedad amoniacal, nitritos y nitratos señalan la proximidad o distancia al punto de vertido de agua residual.

- Concentración del ión amonio:

Es una la primera etapa del ciclo del nitrógeno por transformación de la urea.

El ión amonio procede también de la disolución de amoníaco de alguna de sus sales o compuestos nitrogenados en fase de descomposición de los vertidos.

El agua con un contenido reducido de amoníaco no es perjudicial, en ciertos límites, para usos agrícolas ya que se transforman en nitratos (abonos), pero si es perjudicial para la vida piscícola.

- Concentración de nitritos y nitratos:

Los nitritos y nitratos constituyen una segunda y tercera etapa del ciclo del nitrógeno, al que se llega por la acción de bacterias aerobias, los nitrosomas y los nitrobácteres.

5.2.1.6. Fósforo total

El fósforo es un elemento imprescindible para el desarrollo de los microorganismos de las aguas y, en consecuencia, para el proceso de depuración biológica.

El contenido de fósforo en las aguas se debe a los vertidos urbanos (detergentes, fosas sépticas, etc.) y a los vertidos de las industria agroalimentaria (abonos, piensos compuestos, etc.).

El fósforo puede encontrarse en las aguas disuelto o en suspensión.

Una acción importante de los fosfatos es la influencia en el transporte y retención de los metales en el agua, debido al "fenómeno de complejación".

5.2.1.7. pH

En la naturaleza, así como en los vertidos urbanos e industriales, se encuentran ácidos y bases que modifican ampliamente el pH de las aguas. Unas oscilaciones significativas en el valor del pH significan la aparición de vertidos industriales. Por lo que, este parámetro sirve como indicador de dichos vertidos.

Las aguas urbanas tienen un pH próximo al valor 7, es decir, son adecuadas para microorganismos neutrófilos.

Es preciso controlar el pH para garantizar los procesos biológicos, debiéndose mantener entre valores de 6'2 y 8'5, para que no se generen problemas de inhibición.

5.2.1.8. Cloruros

El ión cloruro está presente siempre en las aguas urbanas, siendo los valores incorporados por habitante muy constantes. Teniendo en cuenta que el 75% de la población vive de cara al mar, este parámetro detectado en los colectores o en la depuradora sirve para comprobar la introducción de aguas de mar dentro de la red de saneamiento.

Otro aspecto importante relacionado con el ión cloruro es el incremento de salinización de las aguas que pueden inhibir la acción de los microorganismos en las depuradoras.

Este parámetro sirve también para detectar vertidos industriales, cuando su concentración presente oscilaciones fuertes o valores distintos a los que corresponden a vertidos netamente urbanos.

5.2.1.9. Grasas

La existencia de hidrocarburos y de grasas en las aguas, causa problemas por su poder tensoactivo que impide la captación de oxígeno, o genera una película envolvente de los flóculos biológicos impidiendo su respiración y aligerándolos llevándolos a flotación, dificultándose así la decantación secundaria.

Otros problemas a destacar son los impactos visuales y la generación de suciedad en todos los elementos puestos en contacto con las aguas.

5.2.2. Caracterización de las aguas residuales urbanas

5.2.2.1. Aguas blancas

Las aguas blancas están formadas fundamentalmente por aguas pluviales, que son las que generan las grandes aportaciones intermitentes de caudal. Pero, debido al aumento de la impermeabilización del suelo de las ciudades (aparcamientos, centros comerciales y de ocio, vías de comunicación subterráneas, etc.) las aguas de drenaje han ido ganando importancia en los últimos años, especialmente por estar afectadas, muy a menudo, por la contaminación procedente de fugas de la red de alcantarillado.

Los siguientes componentes son los que principalmente contaminan las aguas blancas:

- Elementos de contaminación atmosférica: deposición húmeda de las lluvias ácidas.
- Restos de la actividad humana y asociada: papeles, colillas, excrementos de animales (perros, gatos, etc.), restos de la recogida y evacuación de basuras, etc.
- Residuos del tráfico de vehículos: aceites, grasas, hidrocarburos, compuestos fenólicos, etc.
- Arenas, residuos vegetales y biocidas de zonas ajardinadas.
- Contaminación aportada por las aguas de drenaje: aguas salobres, fugas de alcantarillado, etc.

Además de los elementos anteriormente citados, la primera agua de lluvia arrastra los depósitos acumulados en las conducciones, por lo que, a su llegada a la depuradora está, frecuentemente, tanto o más cargada que las aguas negras, este fenómeno se conoce como "first flush".

Tabla 1: Valores medios de contaminación de las aguas blancas (Hernández Muñoz, Aurelio, Hernández Lehmann, Aurelio, & Galán Martínez, Pedro, 2004)

Características	Contaminación (mg/l)
DBO5	25
DQO	65
SS	230
SSV	40
N en (NH3)	0,2
N en (NO2)	0,05
N en (NO3)	0,5
N (orgánico)	1,4
PO4 total	1,15
PO soluble	0,46

5.2.2.2. Aguas negras

En las aguas negras se hallan presentes muchos compuestos químicos, entre los que podemos encontrar microorganismos, urea, proteínas, bases jabonosas, almidones, aceites (animales, vegetales y minerales), hidrocarburos, gases, sales, etc.

En la tabla inferior aparecen los valores representativos de un agua negra con una concentración fuerte, media o ligera.

Tabla 2: Características de las aguas negras (Hernández Muñoz, Aurelio et al., 2004)

Parámetro	Contaminación fuerte	Contaminación media	Contaminación ligera
Sólidos totales	1000	500	200
Volátiles	700	350	120
Fijos	300	150	80
Sólidos en suspensión	500	300	100
Volátiles	400	250	70
Fijos	100	50	30
Sólidos sedimentables	250	180	40
Volátiles	100	72	16
Fijos	150	108	24
Sólidos disueltos	500	200	100
Volátiles	300	100	50
Fijos	200	100	50
DBO5 a 20°C	300	200	100
DQO	800	450	160
Oxígeno disuelto	0	0,1	0,2
Nitrógeno total (N)	86	50	25
Nitrógeno orgánico (N)	35	20	10
Amoníaco libre N-NH4	50	30	15
Nitritos N-NO2	0,1	0,05	0,00
Nitratos N-NO3	0,4	0,2	0,1
Fósforo total (P)	17	7	2
Cloruros	175	100	15
pH	6,9	6,9	6,9
Grasas	40	20	0

Valores en mg/l con excepción del pH.

5.3. ESTACIONES DEPURADORAS DE AGUAS RESIDUALES

Se define una Estación depuradora de aguas Residuales (E.D.A.R.), como una instalación industrial que recoge el agua residual de una población o de una industria y, después de una serie de tratamientos y procesos, la devuelve a un cauce receptor (río, embalse, mar, etc.) en unas condiciones adecuadas para el medioambiente y en conformidad con la normativa vigente.

En el caso de la legislación española, las características exigibles al vertido al cauce receptor se establecen en base a:

- La Directiva 271/91/CEE de la Unión Europea. Los parámetros de control exigidos por dicha norma son los sólidos en suspensión (S.S.), la demanda bioquímica de oxígeno (D.B.O.5), la demanda química de oxígeno (D.Q.O.) el fósforo total y el nitrógeno total. Existe una transposición a la legislación española de esta Directiva y un Plan de Saneamiento y Depuración de Aguas Residuales.
- Los valores límites de vertido establecidos en la autorización de vertido por la Comisaría de Aguas correspondiente a la cuenca donde se vierte. Estos valores vendrán determinados en función de los usos asignados al tramo de río donde se produzca el vertido.
- Las estaciones depuradoras pueden clasificarse en:
- Urbanas, aquellas E.D.A.R. que reciben aguas residuales mayoritariamente de una aglomeración humana. Este tipo de depuradoras, puede subdividirse, atendiendo al grado de complejidad y a la tecnología empleada) en:
 - Tratamientos convencionales. Se emplean en núcleos de población importantes y, que producen un efecto notable sobre el medio receptor. Utiliza tecnologías que consumen energía eléctrica de forma considerable, por el gran número de equipos electromecánicos que incorporan las diferentes unidades de tratamiento y precisan mano de obra especializada.
 - Tratamientos para pequeñas poblaciones. Se emplean en núcleos de población pequeños o edificaciones aisladas. Su principal premisa es la de tener unos costos de mantenimiento bajos y precisar de mano de obra no cualificada. Su grado de tecnificación es muy bajo, necesitando poca o nula energía eléctrica.
- Industriales, aquellas E.D.A.R. que reciben las aguas residuales de una o varias industrias.

5.3.1. Procesos unitarios de una E.D.A.R.

Los objetivos de una estación depuradora son los siguientes:

- Eliminación de residuos (aceites, grasas, flotantes, arenas, etc.) y evacuación de los mismos a un punto de destino final adecuado.
- Eliminación de materias sedimentables orgánicas y no orgánicas.
- Eliminación de la materia orgánica.
- Eliminación de compuestos nitrogenados y que contengan fósforo (especialmente si el vertido se va a producir a una zona sensible).
- Transformar los residuos retenidos en fangos estables y que éstos sean correctamente dispuestos.

Para lograr estos objetivos, las estaciones depuradoras se configuran como una secuencia de procesos unitarios, destinados a eliminar, en diferentes etapas y por medio de diferentes tecnologías, los distintos parámetros de contaminación.

Los procesos unitarios utilizables para la depuración de las aguas residuales depende del tipo de afluente y pueden clasificarse en:

- Procesos físicos:
 - Desbastes por rejillas, tamices o filtración mecánica.
 - Desengrasado. Su misión es la retirada de grasas, hidrocarburos y elementos flotantes en las aguas.
 - Sedimentación, para eliminar los sólidos en suspensión por su mayor densidad en relación a la del agua.
 - Flotación, para eliminar materias en suspensión por su menor densidad en relación a la del agua.
 - Absorción para eliminación de micro-contaminantes, como color, fenoles, etc.
- Procesos químicos:
 - Floculación y coagulación, utilizable cuando existe dificultad para la sedimentación de las partículas en suspensión.
 - Neutralización para modificar el pH.
 - Oxidación.

- Reducción, como la utilización de sulfato de hierro para eliminar el cromo.
- Intercambio iónico, para la eliminación de cobre, zinc, plomo, etc.
- Procesos biológicos:

Con estos procesos se busca conseguir la degradación de la materia orgánica, por medio de la actividad biológica, desarrollada por diferentes grupos de microorganismos presentes en la propia agua residual. Se trata de simular, bajo condiciones controladas, un proceso similar al que tiene lugar de forma natural en los cauces receptores (autodepuración). Se consigue una doble acción, la metabólica y la floculación de las partículas en suspensión.

Los diferentes tipos de procesos biológicos suelen agruparse en dos grandes categorías:

- Procesos de biomasa en suspensión (tipo fangos activos).
- Procesos de biomasa fija (tipo lechos bacterianos).

Los procesos anteriores de tratamiento de aguas, deben ser completados con procesos de tratamiento de lodos, en el que aparecerán los elementos retirados de las aguas.

5.3.2. Esquema general de una estación depuradora de aguas residuales

Tal y como se ha mencionado anteriormente, una estación depuradora es la suma de varios procesos unitarios ordenados en una determinada secuencia lógica.

Los procesos suelen dividirse conceptualmente en dos líneas:

- Línea de agua, donde se trata propiamente el agua residual.
- Línea de lodo, donde se tratan los lodos que se extraen de los diferentes procesos de la línea de agua.

Tabla 3: Diferentes procesos unitarios por líneas (Hernández Muñoz, Aurelio et al., 2004)

LÍNEA DE AGUA	LÍNEA DE LODO
<p>Procesos físicos</p> <ul style="list-style-type: none"> Desbaste Desarenado-Desengrasado Sedimentación Flotación Filtración (*) <p>Procesos químicos</p> <ul style="list-style-type: none"> Coagulación-Floculación (*) Desinfección (*) <p>Procesos biológicos</p> <ul style="list-style-type: none"> Biomasa fija Biomasa en suspensión 	<p>Procesos físicos</p> <ul style="list-style-type: none"> Espesamiento por gravedad Espesamiento por flotación Deshidratación <p>Procesos químicos</p> <ul style="list-style-type: none"> Floculación Estabilización con cal (*) <p>Procesos biológicos</p> <ul style="list-style-type: none"> Digestión aerobia Digestión anaerobia <p>Procesos térmicos</p> <ul style="list-style-type: none"> Secado térmico (*) Incineración (*)

(*) Tratamiento opcional

En la imagen inferior, se puede observar el esquema de una E.D.A.R. convencional. En ella se distinguen con cada uno de los procesos que componen la línea de agua (llegada del agua (1), pretratamiento (2), decantación primaria (3), reactor biológico (4) y decantación secundaria (5)) y la línea de fangos (recirculación de fangos (6), espesador de fangos (7), digestión (8) y deshidratación (9)).

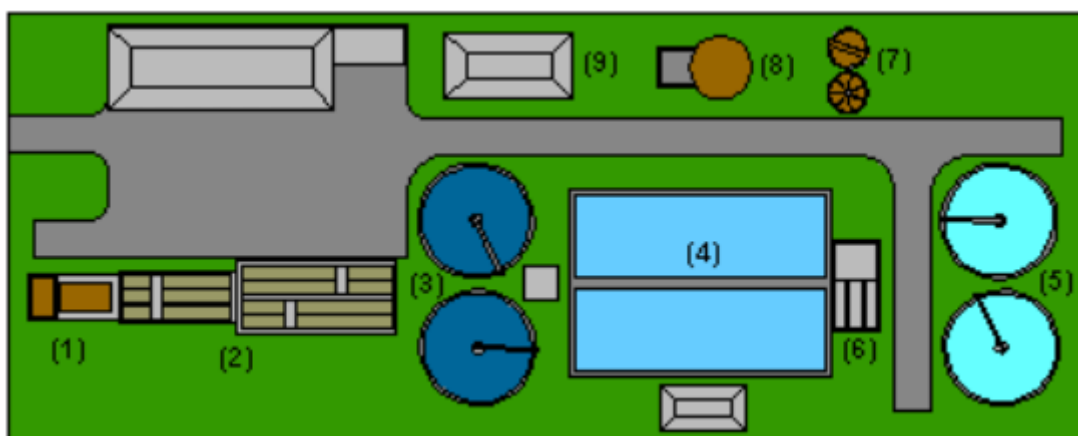


Ilustración 1: Esquema de una E.D.A.R. convencional

5.3.2.1. Línea de agua

Dentro de esta línea de procesos, se pueden distinguir las siguientes etapas de depuración:

- Pretratamiento.
- Tratamiento primario, se denomina tratamiento físico-químico, si el tratamiento físico, sedimentación, está reforzado con un tratamiento químico.
- Tratamiento secundario o tratamiento biológico.
- Tratamiento terciario.

Los rendimientos alcanzables en estas etapas, son aproximadamente los siguientes:

Tabla 4: Rendimiento de depuración en la línea de agua. (Hernández Lehmann, Aurelio, 2015)

Proceso de depuración	Porcentaje de reducción		
	DBO	Sólidos en suspensión	E.Coli
Pretratamiento	0-10	0-10	-
Tratamiento primario. Sedimentación	25-40	40-70	25-55
Tratamiento primario. Físico-químico	50-80	70-80	40-60
Tratamiento secundario. Lechos bacterianos	75-92	75-92	80-90
Tratamiento secundario. Fangos activos	75-95	80-95	80-90
Tratamiento terciario	92-98	93-98	-
Cloración del agua tratada biológicamente	-	-	98-99

5.3.2.1.1. Elementos iniciales de la E.D.A.R.

Conjunto de conducciones, obras hidráulicas y elementos de control, situados a la entrada de la E.D.A.R., que sirven para garantizar que sólo entre en la planta el agua que se pueda tratar y para conocer las características del agua que llega a la depuradora.

- Colector de entrada: colector que permite que el agua a tratar llegue desde su origen hasta la E.D.A.R. Esta conducción puede necesitar, o no, de un bombeo para que el agua llegue a la planta de tratamiento, dependiendo de las condiciones del terreno.
- Toma de muestras en continuo: conjunto de maquinaria situada a la entrada del agua en la estación depuradora que se utiliza para conocer los parámetros y la calidad del agua que llega a la estación.

Tratamiento de aguas residuales

- Aliviadero: obra hidráulica necesaria para evacuar volúmenes de agua superiores a los admisibles por la depuradora. Esta obra es especialmente necesaria en periodos de fuertes tormentas.
- Caudalímetro: elemento de medida de caudal, utilizado para conocer el volumen de agua que entra en la E.D.A.R.
- By-pass de entrada: obra hidráulica que, si es necesario, desvía el caudal de llegada fuera de la planta para evitar la entrada en el sistema de sustancias que puedan colapsar su funcionamiento.

5.3.2.1.2. Pretratamiento

El primer paso de la depuración del agua residual es la eliminación de materias gruesas, cuerpos gruesos y arenosos, cuya presencia en el agua a depurar perturbaría el tratamiento y el eficiente funcionamiento de las máquinas, equipos e instalaciones de la depuradora.

El pretratamiento consta de los siguientes procesos:

- Retorno de aguas: todos los exudados de las diversas unidades de la planta deben ser canalizados y retornados al inicio de la planta para su correcto tratamiento.
- Desbaste: las rejas de desbaste hacen que los sólidos de mayor tamaño transportados por el agua, se detengan en el pozo de gruesos. Estos sólidos son extraídos por una cuchara bivalva del pozo y son tratados como RSU.
- Bombeo: estación de bombeo de agua bruta necesaria para dar suficiente presión al agua para que el resto de la estación depuradora funcione por gravedad.
- Desbaste más fino: eliminación, mediante tamices, de los sólidos flotantes de pequeñas dimensiones contenidos en el agua.

Desarenador-desengrasador: proceso por el cual, gracias al aire aportado por varias soplantes a través de unos difusores, flotarán las grasas y aceites que serán recogidos por raquetas y serán enviadas a un pozo, desde el cual, se bombearán a un contenedor. Al mismo tiempo, la arena sedimentará y será evacuada a través de bombas a un separador de arenas y, posteriormente, a un contenedor para su retirada. Las arenas serán tratadas como RSU y las grasas y aceites como residuos peligrosos.

5.3.2.1.3. *Tratamiento primario*

El tratamiento primario es el conjunto de operaciones, fundamentalmente de tipo físico-químico, cuyo objetivo principal es eliminar la materia sedimentable, así como metales pesados, fósforo y otros contaminantes insolubilizables.

Este proceso de sedimentación se ve ayudado con el empleo de reactivos químicos. En el decantador primario se utilizan dos tipos de reactivos químicos, los coagulantes, iones polivalentes que se añaden para romper el sistema de equilibrio en el que se encuentran las partículas que han de sedimentar, y los floculantes, polielectrolitos con los que se provoca la unión de partículas para favorecer la sedimentación. De este modo, se mejora la sedimentación ya que aumenta el número de sólidos sedimentables.

Además de las operaciones anteriormente descritas, también tiene lugar en este primer tratamiento el ajuste del pH. Ésta es una operación en la que, por medio de la adición de un ácido o una base, se logra reducir el pH del agua a depurar.

Los sólidos sedimentados (lodos primarios) se extraen del decantador y son enviados a la línea de fangos para ser tratados adecuadamente.

5.3.2.1.4. *Tratamiento secundario*

Casi todas las materias existentes en el agua residual son muy inestables y se descomponen rápidamente.

Aparte de los procesos químicos que tienen lugar en el tratamiento primario, la mayoría de los que tienen lugar en la depuración del agua residual están ligados a procesos biológicos.

El objetivo del tratamiento secundario, o tratamiento biológico, es la eliminación, estabilización o transformación de la materia orgánica, presente en las aguas como sólidos no sedimentables. Este objetivo se logra por la acción de los microorganismos mediante dos acciones complementarias:

- Acción metabólica:

La acción metabólica transforma los glúcidos, lípidos, ésteres, hidratos de carbono y prótidos en materia viva.

En el caso de bacterias heterótrofas, sólo una parte del residuo orgánico es convertido en productos finales. La energía obtenida de las reacciones bioquímicas se utiliza en la síntesis de la materia orgánica, transformada en nuevas células.

Tratamiento de aguas residuales

- Acciones físico-químicas:
 - Coagulación
 - Oxidación de la materia orgánica
 - Decantación
 - Arrastre de bacterias

El tratamiento biológico se realiza en reactores biológicos, que pueden presentar apariencias muy diversas (circulares, rectangulares, canales...). Conceptualmente los reactores pueden clasificarse, según la forma en la que la biomasa se encuentra en el medio, en dos grandes grupos:

- Reactores de biomasa fija: en estos sistemas, la biomasa microbiana se desarrolla sobre un soporte físico (piedras, arena o piezas de plástico) que rellena el depósito. Son reactores de este tipo:
 - Lechos bacterianos
 - Contactores biológicos rotativos
 - Biofiltros
- Reactores de biomasa en suspensión: en estas instalaciones, la biomasa microbiana se encuentra flotando en el agua del reactor. Son reactores de este tipo:
 - Fangos activos convencionales
 - Procesos de oxidación prolongada

En cualquier tipo de reactor biológico es necesario proporcionar oxígeno a los microorganismos para que desarrollen su actividad biológica. El oxígeno es aportado por medio de aire captado de la atmósfera.

La decantación secundaria, o clarificación final, se realiza en varios decantadores generalmente circulares dotados de rasquetas que van suspendidas de un puente radial, arrastrando el fango hacia la zona central del decantador, desde donde el fango es extraído. Según el tipo de proceso, una parte del fango será recirculado de nuevo mediante bombas a la entrada del tratamiento biológico. Con esta recirculación se consigue concentrar los microorganismos hasta valores muy altos.

Para mantener controlado el proceso hay que extraer continuamente fango. Las purgas de fangos en exceso (lodos secundarios) se pueden realizar desde el reactor biológico o desde la recirculación, esta última será más concentrada.

Todos los tratamientos biológicos consiguen disminuir la D.Q.O. y la D.B.O.5. Pero, para conseguir eliminar el nitrógeno y el fósforo, se ha de diseñar el proceso específicamente para ello.

5.3.2.1.5. Tratamiento terciario

Tratamiento terciario es un término genérico que describe uno o cualquier número de procesos utilizados para refinar y pulir el agua antes de que sea reutilizada o descargada en un medio acuático cercano.

Es un paso adicional al tratamiento secundario que, normalmente, se necesita para eliminar las sustancias orgánicas o inorgánicas que resisten el tratamiento convencional, ya sea que estén suspendidos, en estado coloidal o disueltos. También se refiere al tratamiento de efluentes, para llevarlos a un estándar de alta calidad.

La realización de este tratamiento terciario es debida, principalmente, a alguna de las siguientes causas:

- Reutilizar el agua tratada para aplicaciones industriales.
- Aumentar la eficiencia de la eliminación de microorganismos y evitar que haya problemas en la desinfección del agua.
- Utilizar el agua tratada para aumentar la disponibilidad de fuentes de suministro superficiales o subterráneas. En este caso, es necesario realizar tratamientos para eliminar los metales pesados y otras sustancias potencialmente tóxicas, así como microorganismos.
- Eliminar nutrientes y otras sustancias antes del vertido del agua trata a medios receptores sensibles.

La gama de contaminantes disueltos en el agua, tras el tratamiento secundario, abarca desde iones simples (tales como calcio, sulfatos, potasio, nitratos y fosfatos) hasta sustancias orgánicas sintéticas complejas. La tabla inferior relaciona los contaminantes que persisten en el agua tras el tratamiento secundario con los procesos unitarios usados para eliminarlos.

Tabla 5: Contaminantes sobre los que actúan los sistemas del tratamiento terciario (Fuentes Díaz, Manuel, s. f.)

Contaminantes	Operaciones o procesos unitarios												
	FMP	FS	MF	UF	OI	ED	AD	AA	II	PAOs	DE	PQ	OQ
Materia suspendida y coloidal													
SST	X	X	X	X	X	X	X		X		X	X	
Sólidos coloidales	X	X	X	X	X	X	X		X		X	X	
Materia orgánica particulada					X	X					X		X
Materia orgánica disuelta													
Carbono orgánico total					X	X	X		X	X	X	X	X
Compuestos orgánicos refractarios					X	X	X			X	X		
Compuestos orgánicos volátiles					X	X	X	X		X	X		
Materia inorgánica disuelta													
Amoniaco					X	X		X	X		X		
Nitrato					X	X			X		X		
Fósforo	X				X	X					X	X	
SDT					X	X			X		X		
Agentes biológicos													
Bacterias			X	X	X	X					X		
Protozoarios	X		X	X	X	X	X		X		X	X	
Virus					X	X					X		

(Fuente: Metcalf and Eddy, 2002)

FMP Filtración en medio poroso
 FS Filtración de superficie (microcribas)
 MF Microfiltración
 UF Ultrafiltración
 PAOs Procesos de oxidación avanzados

OI Ósmosis inversa
 ED Electrodialisis
 AD adsorción
 AA arrastre con aire

II intercambio iónico
 DE Destilación
 PQ Precipitación química
 OQ Oxidación química

A continuación, se describen brevemente los procesos unitarios indicados en la tabla superior:

- Filtración:

Se trata de un proceso físico de eliminación de sustancias que puede dividirse en tres categorías:

- Filtración en lechos o medios porosos:

La eliminación de la materia en suspensión ocurre en la superficie y en el interior del lecho filtrante. El efluente del tratamiento secundario se aplica sobre el lecho filtrante, mientras que el agua pasa a través del medio granular. La materia en suspensión queda atrapada en el medio poroso, ya sea en la superficie o hacia el interior del medio.

- Filtración de superficie:

Este tipo de filtración consiste en eliminar las partículas sólidas suspendidas en el líquido, haciendo circular el agua residual a través de ribas o tamices mecánicos.

- Filtración en membranas:

La membrana es una barrera permeable que permite el paso del agua reteniendo las partículas. Los diámetros típicos de partículas que separa este proceso van de 0.0001 a 1 μm y, por ello, abarcan incluso las sustancias disueltas. La principal diferencia de este medio de filtración con el resto de medios es, que las membranas no acumulan las partículas sino que las lleva fuera del sistema junto con una fracción del líquido (concentrado).

- Electrodialisis:

La electrodialisis es un tipo de filtración con membrana en la que se utiliza membranas alteradas de permeabilidad selectiva a cationes y a aniones. Las membranas están situadas entre dos electrodos, se aplica corriente eléctrica que ayuda a acelerar la migración de los iones a través de las membranas. Los cationes se mueven hacia un lado y los aniones hacia el lado contrario. De este modo, se crean celdas o espacios de agua con bajas concentraciones de materia y celdas con concentraciones elevadas.

- Adsorción:

La adsorción es una operación de transferencia de masa, en la cual un contaminante en la fase líquida se transfiere a la fase sólida. El adsorbato (contaminante a eliminar del agua) se retiene en lechos fijos y el agua fluye continuamente a través del lecho hasta que el sólido (adsorbente) está casi saturado y ya no es eficiente.

El proceso de adsorción ocurre en cuatro fases, más o menos, bien diferenciadas:

- Transporte en columna líquida.
- Difusión en película líquida.
- Transporte en los poros.
- Sorción.

Tratamiento de aguas residuales

- Arrastre con aire:

Proceso de transferencia de masa entre distintas fases. Un contaminante gaseoso que esté contenido en una fase líquida se transfiere a una corriente gaseosa, normalmente aire, libre de contaminante. Cuando el aire es introducido en el agua residual, los compuestos a eliminar son transferidos del agua al gas.

- Intercambio iónico:

Proceso unitario en el que los diferentes iones del agua residual desplazan a los iones sustituibles de un determinado material de intercambio. Una vez que se satura el medio (esto se produce cuando los iones sustituibles ya han sido desplazados y sustituidos), es necesario restablecer la capacidad de intercambio del medio. Esto se realiza mediante los ciclos de regeneración, se trata de un "lavado" (que puede ser a contracorriente o en la misma dirección del flujo principal) con una solución que contiene los iones que, originalmente, están presentes en el material de intercambio.

- Oxidación avanzada

Las aguas contaminadas por la actividad humana pueden, en general, ser procesadas eficientemente por plantas de tratamiento biológico, por adsorción con carbono activado (u otros adsorbentes) o por tratamientos químicos convencionales (oxidación química, cloración, ozonización, etc.). Sin embargo, en algunos casos estos tratamientos resultan inadecuados para alcanzar el grado de pureza requerido por ley o por el uso posterior del efluente tratado. En estos casos, se puede recurrir a las llamadas tecnologías avanzadas de oxidación (TAOs) o procesos avanzados de oxidación (PAOs).

- Destilación

La destilación es una separación de los materiales de los poco volátiles por un proceso de vaporización y condensación

Cuando una mezcla líquida de dos o más componentes es llevada al punto de ebullición, se crea una fase de vapor sobre de la fase líquida. Si las presiones de vapor de los componentes puros son diferentes (lo más habitual), los constituyentes tienen la presión de vapor más alta estarán más concentrados en la fase vapor que los constituyentes que tienen la

presión de vapor baja. Si el vapor es enfriado por un campo líquido, resultará una separación parcial de los constituyentes. El grado de separación depende de las diferencias relativas en la presión de vapor. Cuanto mayor sea la diferencia, mejor será la separación.

Pueden ser utilizados cuatro tipos de destilación:

- Destilación por lotes.
- Destilación fraccionada.
- Arrastre con vapor.
- Evaporación de película delgada.

- Precipitación química

La precipitación química consiste en llevar la materia disuelta, especialmente la inorgánica, a un estado suspendido para después separarla ya sea por precipitación o filtración. Estos se pueden lograr mediante compuestos que eleven el pH o al agregar sales metálicas.

- Oxidación química

En aplicaciones de tratamiento avanzado de agua residual, la oxidación química puede ser utilizada para eliminar amoníaco y reducir la concentración de orgánicos remanentes o el contenido de bacterias y virus de dichas aguas.

Debido a que el cloro provoca la transformación de trihalometanos (THMs), se investigan alternativas al uso de este compuesto en aquellos casos en los que la presencia de trihalometanos representa un problema de alta importancia en el suministro del agua potable. Los oxidantes alternativos más usados son el dióxido de cloro y el ozono. Cuando se usan estas sustancias para este tratamiento, la desinfección del agua residual es generalmente un beneficio adicional.

Tabla 6: Eficiencia de los sistemas terciarios para la eliminación de contaminantes (I) (Fuentes Díaz, Manuel, s. f.)

	Filtración en medio poroso %	Microcribas %	Microfiltración y ultrafiltración %	Ósmosis inversa %	Electrodialísis %	Adsorción %	Arrastre con aire %
SST	99	70-90					
DBO5						50-60	
DQO							
Fósforo							0-20
Baterias	99,99		90-99	90-99		20-60	0-20
Virus			90-99	90-99		20-60	0-20
SDT			20-60	80-90	60-90	0-20	0-20
SAAM							
Turbiedad			90-99	90-99		20-60	0-20

Tabla 7: Eficiencia de los sistemas terciarios para la eliminación de contaminantes (II) (Fuentes Díaz, Manuel, s. f.)

	Intercambio iónico %	Oxidación avanzada %	Destilación %	Sedimentación coagulación %	Oxidación química %	Precipitación química %
SST			90-95	60-90		80-90
DBO5			90-95	40-70		70-99
DQO			90-95	30-60		30-60
Fósforo			90-95	70-90		75
Baterias	0-20	90-99	90-95	80-90	90-99	80-90
Virus	0-20	90-99		80-90	90-99	
SDT	0-20	0-20	90-95	0-20	0-20	
SAAM						
Turbiedad	20-60	90-99	90-99	90-99	90-99	

El tratamiento terciario, está diseñado para retirar los compuestos orgánicos no biodegradables, los nutrientes minerales, especialmente el nitrógeno y el fósforo y otros compuestos tóxicos de vertidos industriales como metales pesados y radicales tóxicos.

También incluimos como tratamiento terciario la desinfección del agua, proceso que tiene como objeto la eliminación de microorganismos patógenos que pudiera contener el agua.

- Eliminación de nutrientes

El objetivo de este proceso es la eliminación del nitrógeno y del fósforo, ya que son los principales nutrientes a considerar en los vertidos de las aguas residuales, como responsables de los problemas de eutrofización del agua (proceso natural y/o antropogénico que consiste en el enriquecimiento de las aguas con nutrientes, a un ritmo tal que no puede ser compensado por la mineralización total, de manera que la descomposición del exceso de materia orgánica produce una disminución del oxígeno en las aguas profundas (CONICET, 2011)).

- Eliminación de nitrógeno

En los vertidos de origen animal, humanos o zootécnicos, el N se encuentra en forma orgánica y ureica (orina). En ambiente hídrico, ambos rápidamente sufren un proceso de transformación a N amoniacal, lo que se conoce como amonificación. Por lo que, el nitrógeno a la entrada de la depuradora se encuentra en forma orgánica y amoniacal, ambos muy solubles y difíciles de eliminar.

Durante las primeras fases del tratamiento del agua en la depuradora, prácticamente todo el nitrógeno se transforma en amonio. Posteriormente, en el reactor aerobio, se produce la nitrificación (transformación del amonio en nitrato, al estar en un ambiente rico en oxígeno).

Si no se realizara ningún tratamiento específico, el agua de vertido sería rica en nitratos, menos dañina que el agua rica en amonio y nitrógeno orgánico inicial, pero aún perjudicial.

Por ello, debe realizarse una desnitrificación del agua. Existe un método biológico que consiste en la conversión de los nitratos a nitrógeno en forma de gas (que escapa a la atmósfera) por medio

de la acción de bacterias heterótrofas facultativas en un medio anóxico (carente de oxígeno y rico en nitratos). Estas bacterias utilizan los nitratos como fuente de energía en lugar del oxígeno, produciendo N_2 como catabolito gaseoso. La eficacia de la desnitrificación se puede cifrar en una remoción del 60-80 % del nitrógeno total. Existen dos variantes del método:

- Desnitrificación después de la nitrificación

Consiste en instalar un tanque anóxico, sin ningún tipo de oxigenación, a la salida del clarificador, donde se desarrollen las bacterias desnitrificantes en estado de quietud.

Este sistema tiene un inconveniente, y es que el agua clarificada no tiene suficiente cantidad de carbono orgánico para la alimentación de las bacterias, por lo que se hace necesario el aporte externo de una fuente de carbono. Se puede emplear al efecto, sacarosa, metanol, etc.

- Desnitrificación antes de la nitrificación

Este es el sistema más empleado, pues no requiere de un aporte exógeno de carbono al utilizar la MO disuelta en el agua.

Consiste en instalar la cámara anóxica antes del reactor aerobio en la línea de agua, recirculando el agua rica en nitratos del reactor a la cámara anóxica, se mantiene el tiempo necesario para realizar la desnitrificación y se vuelve a verter al agua al reactor. Lo más usual es adosar la cámara anóxica a la cabeza del reactor separando ambos por un tabique.

La eficacia de la remoción del nitrógeno es directamente proporcional al porcentaje de recirculación del agua rica en nitratos que diseñemos, por lo que hay que tener en cuenta la carga inicial de nitrógeno, para fijar la recirculación de nitratos (por ejemplo, si recirculamos un 80 % de nitratos, eliminaremos un 80 % del N).

El sistema puede tener dos principales variantes dependiendo desde donde se recircule el agua rica en nitratos:

- Se puede recircular el agua desde la salida del reactor biológico hasta la cámara anóxica.
- Se puede recircular el agua desde la salida del clarificador hasta la cámara anóxica.

○ Eliminación de fósforo

Normalmente solo alrededor del 10 % del P total se encuentra en forma insoluble, por lo que es eliminado en el pretratamiento y sedimentación primaria, el resto es soluble y pasa al resto del tratamiento de la planta depuradora.

El vertido de aguas con gran carga de fósforo, si no es eliminado en mayor cuantía, su vertido puede provocar eutrofización en zonas sensibles.

Para la eliminación masiva del fósforo se utilizan dos métodos principalmente:

- Eliminación por vía química:

Consiste en añadir al agua productos químicos que formen moléculas insolubles con el fósforo, fácilmente eliminables por sedimentación. Los productos que se adicionan son sales metálicas que producen precipitación de los fosfatos, destacando el aluminato sódico, cloruro férrico, sulfato férrico y cal. Lo más utilizado es el cloruro férrico.

- Eliminación por vía biológica:

Consiste en provocar un estresamiento de un grupo de bacterias, PAO (organismos acumuladores de fósforo), acinetobacter, pseudomonas, aeromonas, enterobacter, etc capaces de acumular en su medio interno P, en una cantidad mayor a sus exigencias metabólicas, es decir, acumulan P como reserva.

El estresamiento se provoca sometiendo a las bacterias a un ambiente anaerobio (reactor anaerobio), en el cual las

bacterias liberan P al medio, y posteriormente al volver a un estado óxido ó aerobio (reactor aerobio) absorben rápidamente P y en una cantidad superior a la inicialmente liberada.

Posteriormente estas bacterias cargadas de P, son precipitadas en el clarificador y evacuadas en la purga de lodos. Con este sistema se elimina hasta un 80 % del P, y si no se consigue reducir hasta la concentración permitida de vertido, nos ayudaremos de la precipitación química.

5.3.2.2. Línea de lodo

La línea de lodos de una depuradora constituye una parte fundamental de la misma, ya que supone cerca de la mitad del coste de inversión y porcentajes mayores en costes de mantenimiento. En el tratamiento de los lodos ha de tenerse en cuenta el destino final de estos, porque dicho tratamiento condicionará las características del producto final obtenido.

Los objetivos del tratamiento de los lodos son la reducción del volumen (para facilitar su manejo) y la reducción del poder de fermentación (reduciendo la materia orgánica y los organismos patógenos), de este modo, se evita la producción de olores y la evolución del lodo de manera descontrolada. Por ello, en las estaciones depuradoras de aguas residuales deberá existir una línea de lodos con el fin de realizar los siguientes procesos:

- Estabilización del lodo: proceso en el que se elimina la carga patógena del lodo, se puede realizar por tratamiento químico o por tratamiento biológico.
- Deshidratación del lodo: proceso necesario para facilitar el manejo, almacenamiento, transporte y valorización del lodo.

La línea de lodos se compone de un conjunto de operaciones que aparecen detalladas en la siguiente tabla:

Tabla 8: Operaciones y tipos de tratamientos de la línea de lodos (Murcia Navarro, Francisco José, 2013)

Operación	Tipo de tratamiento
Espesamiento	Espesamiento por gravedad, flotación, centrifugación, filtros banda por gravedad, tambor rotatorio
Estabilización	Química, aerobia, anaerobia, térmica
Acondicionamiento	Químico, térmico, elutriación
Deshidratación	Eras de secado, lagunas, filtración a vacío, filtro banda, filtro a presión, centrifugación

5.3.2.2.1. *Espesamiento*

El espesamiento consiste en aumentar el contenido de sólidos del lodo por eliminación de una parte del líquido que contiene. Se consigue reducir entre una y cuatro veces el volumen inicial del lodo y es una operación que puede realizarse antes o después de la estabilización.

Tabla 9: Métodos de espesamiento para lodos residuales (Cardoso Vigueros, Lina & Ramirez González, Antonio, s. f.)

Tratamiento		Tipo de lodo	Frecuencia de uso y éxito relativo
Gravedad		Primario	Comúnmente usado y con excelentes resultados
		Primario y purga de lodos activados	Usado a menudo. Para pequeñas plantas con buenos resultados con concentraciones de lodos en un rango de 4% a 6%. Para grandes plantas, los resultados no son buenos.
		Purga de lodos activados	Rara vez usado, concentración pobre de sólidos.
Flotación con aire disuelto		Primario y purga de lodos activados	Usos limitados. Resultados parecidos al espesamiento por gravedad.
		Purga de lodos activados	Comúnmente usado y con buenos resultados (3'5% a 5% de concentración de sólidos).
Centrífuga	De cesta	Purga de lodos activados	Usos limitados y excelentes resultados (8% a 10% de concentración de sólidos).
	De camisa maciza	Purga de lodos activados	Aumentando su uso y buenos resultados (4% a 6% de concentración de sólidos).
Filtro banda		Purga de lodos activados	Aumentando su uso y buenos resultados (4% a 6% de concentración de sólidos).
Tambor rotativo		Purga de lodos activados	Uso limitado y buenos resultados (5% a 9% de concentración de sólidos).

- **Espesamiento por gravedad**

El espesamiento por gravedad se realiza en un tanque similar a un tanque de sedimentación. Se utiliza, por lo general, un tanque circular. El lodo diluido es conducido a un pozo de alimentación. El lodo alimentado sedimenta, se compacta y es retirado por el fondo del tanque.

Los mecanismos convencionales de recogida de lodo consisten en rasquetas de fondo muy robustas. La estructura sumergida en la que se

apoyan las rasquetas tiene unas varillas verticales (piquetas), usadas para agitar suavemente los lodos para acelerar la sedimentación.

El sobrenadante resultante es recirculado al pretratamiento de inicio de la línea de agua. El lodo espesado que se recoge del fondo del tanque es bombeado hacia el siguiente tratamiento de la línea de lodos.

- Espesamiento por flotación con aire disuelto

El espesamiento por flotación con aire disuelto es el procedimiento más usado, aunque existen otros métodos como pueden ser la flotación a vacío o la flotación por aireación. En este proceso, se satura de aire una porción del agua residual separada del fango manteniéndola a una presión determinada. Cuando se despresuriza la disolución, el aire disuelto se libera en forma de burbujas finamente divididas que arrastran el fango hasta la superficie, desde donde es eliminado. Este tipo de espesamiento se utiliza para lodos muy ligeros, destacando los que provienen del tratamiento biológico.

Este tipo de espesamiento tiene como ventaja, frente al espesamiento por gravedad, la menor superficie y volumen del equipo para el mismo rendimiento y la obtención, con lodos coloidales, de mayores concentraciones. La desventaja que presenta es un mayor coste de explotación y la no posibilidad de almacenamiento de los lodos en su interior.

- Espesamiento por centrifugación

Las centrífugas se utilizan en el espesado y en la deshidratación de los lodos. Su aplicación en el espesamiento se limita, normalmente, a lodos activados biológicamente. El espesamiento centrífugo involucra el almacenamiento de partículas de lodo bajo la influencia de fuerzas centrífugas. Los dos tipos de centrífugas usados actualmente son:

- Centrífuga de cesta: tiene un funcionamiento discontinuo. El fango líquido se introduce en una cesta que gira alrededor de un eje vertical originando con ello la acumulación de los sólidos en las paredes. Cuando alcanza el tiempo de retención de sólidos, se reduce la velocidad de giro y se introduce un rascador que separa los sólidos.

Tratamiento de aguas residuales

En condiciones normales, la utilización de polielectrolito consigue aumentar la concentración de la torta. Sin embargo, el coste energético y de mantenimiento puede ser importante.

- Centrífuga de camisa maciza: consiste en una camisa maciza dispuesta horizontalmente, con un extremo de forma troncocónica. El lodo se alimenta de forma continua y los sólidos se concentran en la periferia. Un tornillo helicoidal, girando a una velocidad menor, mueve los lodos acumulados hacia el extremo reducido donde tiene lugar una concentración adicional de sólidos. Entonces, el lodo es descargado fuera de la centrífuga.

En condiciones normales, la utilización de polielectrolito consigue aumentar la concentración de la torta. Sin embargo, el coste energético y de mantenimiento puede ser importante.

- Espesamiento en filtro banda

El equipo de espesamiento consiste en una banda de gravedad que se mueve sobre rodillos accionados por una unidad de velocidad variable. El lodo es acondicionado con polímeros y alimenta una caja de distribución en un extremo de la banda.

La caja distribuidora reparte el lodo uniformemente a todo lo ancho de la banda móvil, el agua escurre a través de la banda y el lodo, que se va concentrando a medida que se desplaza, es llevado hacia la descarga del espesador. En el trayecto de la banda, el lodo se amontona y es dividido por una serie de cuchillas a lo largo y ancho de la banda, permitiendo que el agua liberada pase a través de la banda.

- Espesamiento por tambores rotativos

Este método consta de dos subsistemas, uno de acondicionamiento de lodos residuales (incluyendo la dosificación de polímeros) y otro formado por la rejillas cilíndricas rotatorias o tambores.

En el primer tambor el lodo diluido se mezcla con los polímeros. Una vez hecha la mezcla, el lodo acondicionado pasa a las rejillas cilíndricas rotatorias donde se separan los sólidos floculados del agua. El lodo espesado sale por un extremo de los tambores, mientras el agua separada cae a través de las mallas.

5.3.2.2.2. Estabilización

La estabilización consiste en reducir el contenido de biosólidos generados durante el tratamiento biológico y otras sustancias, tanto orgánicas como inorgánicas, que hacen que del agua un agente agresivo para el medio ambiente.

Los criterios más importantes para determinar si el sistema de estabilización de lodos funciona son la reducción de materia orgánica (medida como sólidos volátiles (SV)) y la reducción de microorganismos patógenos.

Las tecnologías de estabilización de lodos más habituales son:

- Estabilización química

Este tipo de estabilización se lleva a cabo mediante la adición de productos químicos a los lodos, los cuales son inactivados en gran medida.

Habitualmente se utiliza hidróxido cálcico, que produce un considerable aumento del pH, eliminando los microorganismos. Con este procedimiento se favorece la liberación de amoníaco, por lo que desde el punto de vista agrícola puede haber una reducción del valor fertilizante del lodo. La sustancia más usada es la cal (hidratada o cal viva) que debido al elevado pH (pH=12) que instaura en el lodo, impide la acción de las bacterias y la descomposición de la materia orgánica se detiene. Los reactivos aportados no modifican la cantidad de materias biodegradables, sino que realizan una acción bactericida. Generalmente, disminuye la mayor parte de las bacterias patógenas.

La estabilización química de lodos se trata de una operación simple y con bajo coste, pero posee un efecto residual más limitado respecto a los procesos de estabilización biológica. Además, si por cualquier causa el pH desciende, el proceso de descomposición se reanuda. Por todo ello, es un método poco utilizado.

- Digestión anaerobia

La digestión anaerobia es la solubilización y fermentación de sustancias orgánicas complejas en ausencia de oxígeno. Con este tipo de estabilización se producen gases (metano, dióxido de carbono y ácido sulfhídrico), células y lodos con una fracción mineral cercana al 60% (lodos estabilizados).

Los compuestos orgánicos complejos de los lodos son hidrolizados y convertidos en compuestos más simples (ácidos grasos, monosacáridos, aminoácidos y compuestos aromáticos simples) por la población microbiana. Todos ellos son transformados en ácidos orgánicos de cadenas pequeñas, incluyendo al acético y al láctico. Estos ácidos son entonces convertidos en metano, dióxido de carbono y otros gases por la metanogénesis.

El digester consiste en un tanque, generalmente cilíndrico, con una pendiente hacia el fondo y una bóveda techada. Los digestores anaerobios se pueden clasificar en:

- Digestores de baja carga:

El lodo se introduce al tanque sin sistema de mezclado y la estabilización se logra en condiciones estratificadas dentro del digester:

- El metano se acumula en la bóveda, se extrae y almacena para su uso.
- Las espumas se extraen para su eliminación, evitando así que creen problemas en el digester.
- El sobrenadante es enviado al sedimentador primario o al tratamiento biológico, contiene altas concentraciones de nitrógeno y fósforo.
- El lodo estabilizado sedimentado en el fondo del tanque es conducido a la siguiente fase de tratamiento.

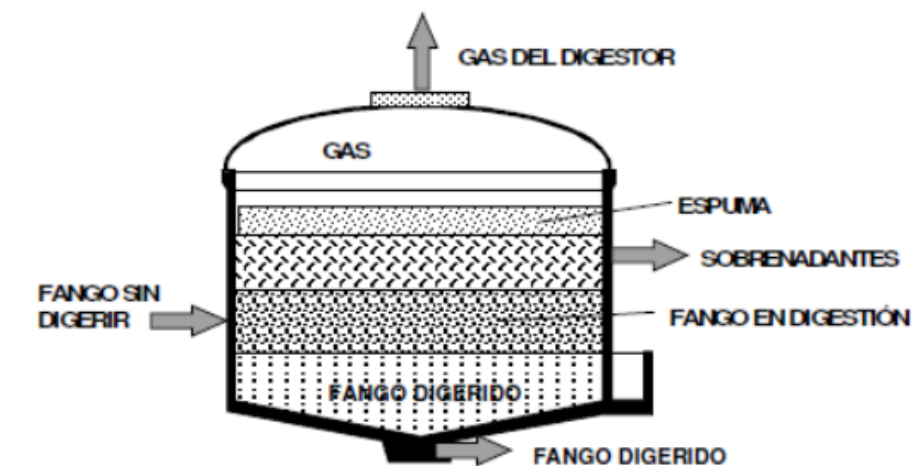


Ilustración 2: Estratificación de un digester anaerobio

La digestión a baja velocidad es caracterizada por una alimentación intermitente y bajas cargas orgánicas. Los tanques son grandes, en relación al volumen de lodo que se trata, y se tiene un tiempo de retención de treinta a sesenta días.

o Digestores de alta carga:

Los digestores de alta carga operan en rangos de temperatura mesofílicas y termofílicas, por lo que requieren un sistema de calefacción del lodo y deben estar aislados del medio. Del mismo modo, estos digestores requieren de un mezclado para mantener una distribución uniforme del contenido y la alimentación debe ser continua o en intervalos de 30 a 120 minutos.

Este tipo de digestión divide las funciones de fermentación y separación del sólido líquido en dos tanques en serie. El primero de ellos es un sistema de estabilización de alta velocidad, mientras que el segundo es para la separación.

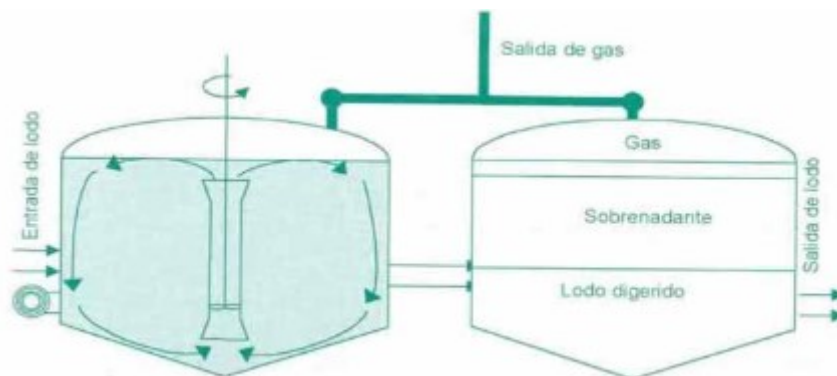


Ilustración 3: Digestor de alta carga (Cardoso Vigueros, Lina & Ramirez González, Antonio, s. f.)

• Digestión aerobia

La estabilización de lodos por digestión aerobia está basada en la respiración endógena, fenómeno que ocurre cuando hay poco sustrato disponible (alimento) para los microorganismos y continúa la aireación de los lodos. En estas condiciones, los microorganismos empiezan a consumir su propio protoplasma con el fin de obtener energía para las reacciones de mantenimiento de las células. Aunque el proceso de digestión debería completarse, sólo entre el 75% y el 80% del total de las

células es oxidado. El resto está formado de compuestos orgánicos que no son biodegradables.

Existen tres variantes del proceso de digestión de lodos por vía aerobia:

- Digestión aerobia convencional

Este tipo de digestión aerobia utiliza tanques abiertos a la atmósfera, en los cuales se aplica aire a los lodos espesados. El aire se aplica mediante medios mecánicos (hélices o turbinas) o mediante difusores.

- Digestión aerobia por oxígeno puro

Esta digestión aerobia tiene dos modalidades, en tanques abiertos a la atmósfera y en tanques cerrados. En el sistema de tanques abiertos, el oxígeno se inyecta a través de difusores especiales que producen microburbujas que se disuelven antes de llegar a la interfase agua-atmósfera. Para el sistema de tanques cerrados, se mantiene una atmósfera de oxígeno puro y el oxígeno se transfiere mediante aireadores mecánicos.

- Digestión aerobia termofílica autotérmica

Este tipo de digestión aerobia utiliza la energía liberada por la oxidación de la materia orgánica, incrementando la temperatura para disminuir el tiempo de degradación de los sólidos suspendidos.

Los digestores son cerrados y aislados térmicamente para conservar el calor generado en el proceso, alcanzando unas temperaturas de operación entre 55°C y 70°C. El suministro de oxígeno se puede realizar mediante difusores o con oxígeno puro.

5.3.2.2.3. Acondicionamiento

Se trata de un proceso físico-químico cuya principal finalidad es la ruptura de la estabilidad coloidal para liberar parte del agua ligada a los coloides. Existen varios tipos de acondicionamiento:

- Acondicionamiento químico

Permite reducir la humedad del fango, desde el 90-99% hasta el 60-85%, dependiendo de la naturaleza de los sólidos a tratar. El acondicionamiento químico provoca, mediante los fenómenos de coagulación y floculación, la

unión de las partículas coloidales formando flóculos que facilitan la posterior deshidratación.

Los floculantes pueden ser inorgánicos (como sales de hierro y sulfato de aluminio, solos o con adición de cal) o productos orgánicos como los polielectrolitos. Los floculantes inorgánicos aumentan la masa de sólidos de los lodos por formación de productos de reacción. Los productos orgánicos más utilizados actualmente son los polielectrolitos sintéticos, formados por largas cadenas macromoleculares ramificadas con grupos de carácter aniónico o catiónico. Los polímeros catiónicos son eficaces en los lodos con un elevado contenido en materia orgánica, mientras que los aniónicos se emplean en lodos con altos contenidos minerales.

La dosis óptima de floculante varía según las características del lodo, siendo necesario realizar ensayos de laboratorio para obtener el valor de esta.

- Acondicionamiento térmico

Este proceso consiste en calentar el lodo durante periodos cortos de tiempo bajo presión, dando como resultado la coagulación de los sólidos y la rotura de coloide. Como consecuencia de lo anterior, el lodo es esterilizado y prácticamente desodorizado. Este tipo de tratamiento tiene mayor aplicación en los lodos biológicos, que pueden ser difíciles de estabilizar por otros medios. Su uso está limitado a grandes plantas debido a los altos costos de inversión. (Murcia Navarro, Francisco José, 2013)

Existe otro proceso de acondicionamiento térmico por el que también se consigue romper los enlaces entre el agua y la materia coloidal. Este proceso es la congelación, pero es un procedimiento que ha tenido pocas aplicaciones y es muy caro.

5.3.2.2.4. *Deshidratación*

La deshidratación es un proceso físico cuyo objetivo es reducir el volumen de los lodos, tratando de obtener un material semisólido más fácil de manejar en sus posteriores usos.

Los siguientes sistemas de deshidratación son los más habituales en las depuradoras españolas:

- Eras de secado

Este sistema de deshidratación es el primero que se utilizó. El procedimiento consiste en extender los lodos a secar sobre una superficie al aire libre dotada de un buen drenaje. La superficie de las eras varía en función del clima de la zona. En ocasiones, en zonas de abundantes precipitaciones, se construyen cubiertas con el fin de proteger los lodos de la lluvia. Para este sistema, la torta de lodo se suele considerar deshidratada suficientemente cuando la humedad desciende por debajo del 65%.

El lodo se deshidrata por drenaje a través del lecho filtrante y por evaporación desde la superficie expuesta al aire. La mayor parte del agua es extraída por drenaje, por lo que es necesario disponer de un sistema de drenaje adecuado y en buen estado.

El lecho filtrante o de secado está constituido por dos capas, una de arena y la otra de grava. El lodo deshidratado se puede extraer de forma manual o de forma mecánica. La torta de lodo posee una textura gruesa y agrietada y es de color negro o marrón oscuro.

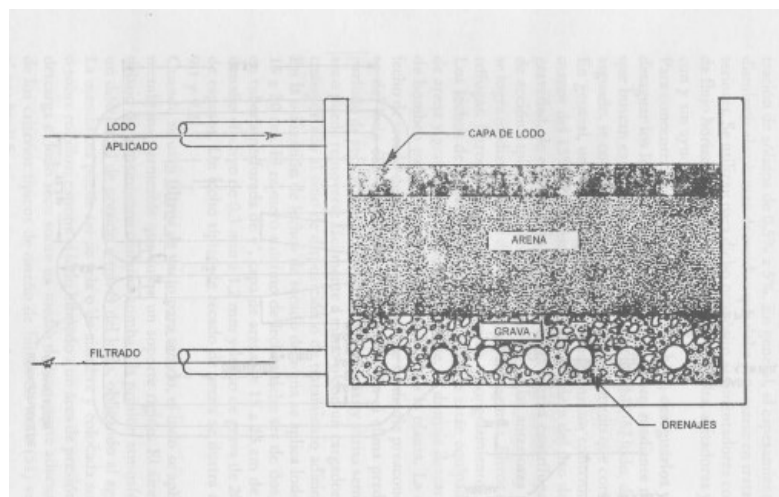


Ilustración 4: Corte de una era de secado (Jairo Alberto Romero Rojas, 1999)

Su uso, habitualmente, se plantea para poblaciones inferiores a 20000 habitantes equivalentes. Ya que para esta cantidad de población, el rendimiento de las eras de secado es comparable al del sistema mecánico más eficiente. Además, si se dispone de espacio suficiente, este método de deshidratación presenta unos costos de inversión y explotación satisfactorios. (Acero Oliete, Alejandro Jesús & Lorén Zaragoza, Francisco Javier, 2014c)

- Centrifugas

La centrifugación supone la sedimentación de las partículas del lodo bajo la influencia de la fuerza de la gravedad. Gracias a esta fuerza, consigue separar componentes inmiscibles basándose en su distinta densidad.

Las centrifugas constan de un tornillo con forma de hélice que gira alrededor de su eje encerrado en una cubeta de forma cilíndrico-cónica que gira a menor velocidad. El fango se introduce por el eje y, debido a la fuerza centrífuga, la parte sólida se recoge de las paredes de la cubeta de forma separada al agua. El fango acumulado es arrastrado hacia el fondo cónico gracias al giro del tornillo, consiguiéndose una compactación adicional. Seguidamente, los sólidos son extraídos de la centrifuga.

Tal y como se ha comentado en puntos anteriores de este documento, las centrifugas también son utilizadas en las operaciones de espesado de lodos. La imagen inferior representa el esquema de una planta de tratamiento de aguas residuales con centrifugas en las operaciones de espesado y deshidratación de lodos.

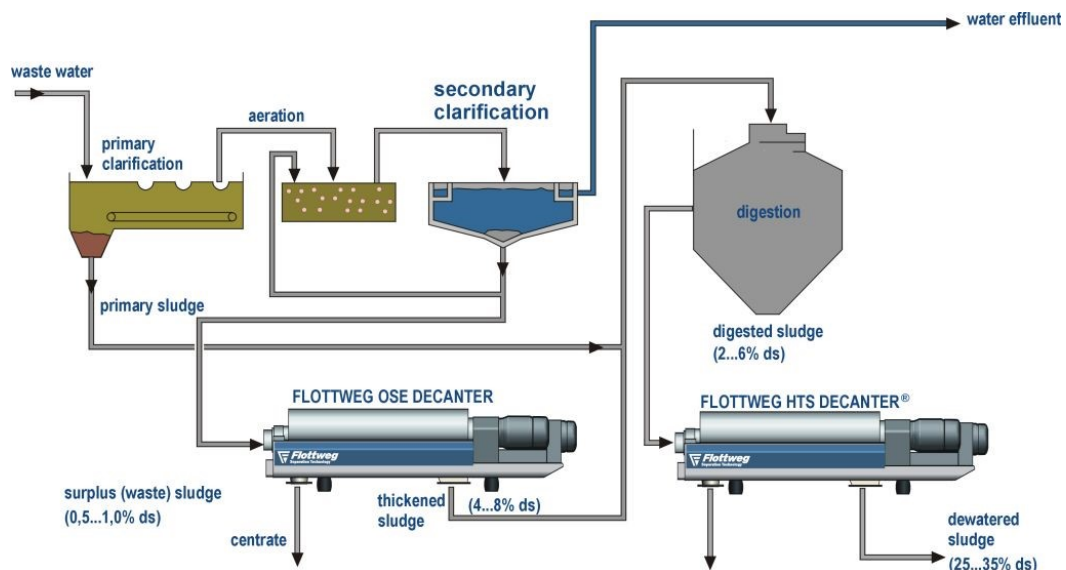


Ilustración 5: Esquema de una E.D.A.R.

- Filtros banda

El filtro banda consiste en dos bandas permeables entre las que se sitúa el fango a deshidratar. Este conjunto pasa a través de una serie de rodillos colocados para conseguir la mayor compresión del fango. En algunos modelos, se hace el vacío en alguna zona del recorrido del lodo para aumentar la extracción del agua.

Tras el acondicionamiento químico del lodo, se pueden distinguir dos etapas dentro del filtro banda: drenado por gravedad (se realiza extendiendo una delgada de lodo sobre la superficie de una banda-tamiz) y drenado por compresión (se lleva a cabo al comprimir el lodo entre dos bandas porosas, aplicando una presión uniforme a lo ancho de la superficie de los rodillos).

La parte de la banda que va de regreso hacia la entrada de la prensa pasa por unos chorros de agua. Tanto éste agua de lavado, como el agua extraída en la operación de deshidratación, es recirculada al inicio de la línea de aguas para su tratamiento.

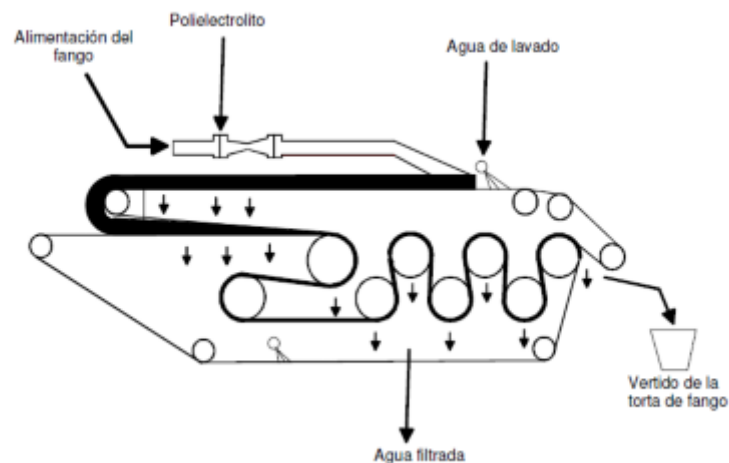


Ilustración 6: Filtro banda (Acero Oliete, Alejandro Jesús & Lorén Zaragoza, Francisco Javier, 2014c)

- Filtros prensa

Los filtros prensa funcionan de forma discontinua, a diferencia de la mayoría de métodos de deshidratación que lo hacen de forma continua. A pesar de ello, es un método que se utiliza cada vez con más frecuencia ya que con él se obtienen lodos muy deshidratados.

Estos filtros consisten en una serie de celdas o bolsas de tela filtrante por ambos lados colocadas en posición vertical, el lodo se introduce en dichas celdas o bolsas y es prensado mediante un sistema hidráulico. El agua extraída de los fangos, es conducida por unos drenes para su tratamiento en la línea de agua y las tortas de fango son transportadas para su almacenamiento, previo a su destino final.

Un filtro prensa, tiene las siguientes fases de funcionamiento:

- Llenado
- Filtrado
- Vaciado
- Lavado

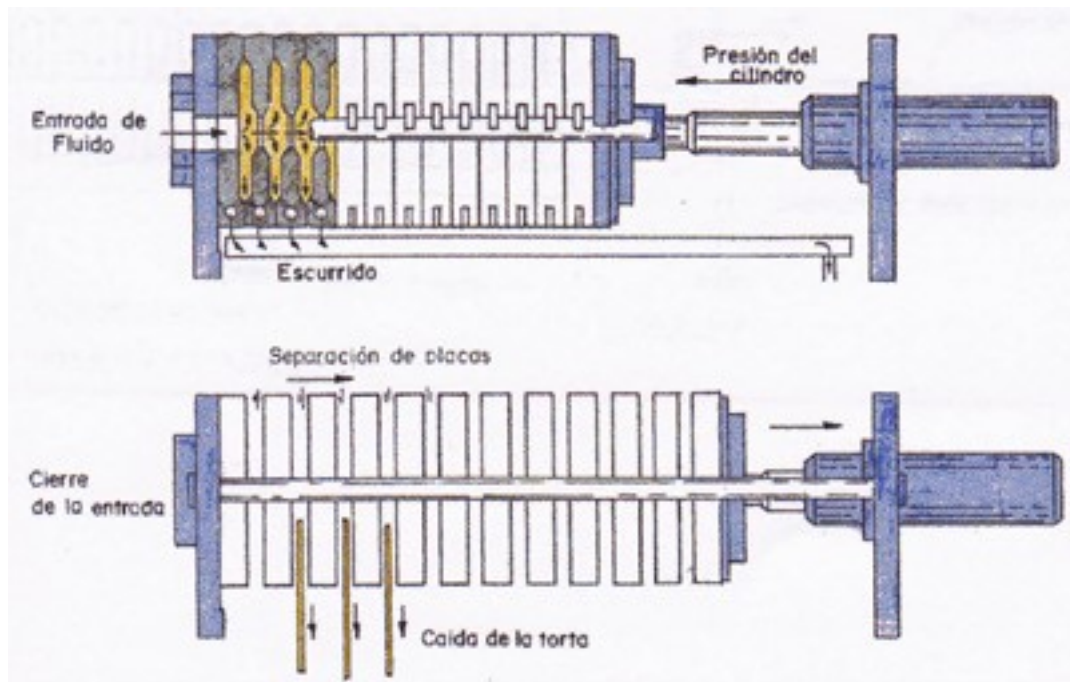


Ilustración 7: Funcionamiento de un filtro prensa

5.3.2.2.5. Destino final de los lodos

Tradicionalmente, el destino de los lodos era ser enviados a un vertedero en el que eran almacenados. En los últimos años, esta tendencia está cambiando buscando la reducción del volumen de los lodos y su posterior reutilización. Con la finalidad de alcanzar este objetivo, hay países que han prohibido totalmente el vertido controlado de los lodos (Suiza o Austria). En España, en cambio, no ha tenido lugar esa prohibición aunque sí que ha disminuido la cantidad de lodos que son enviados a dicho destino. (Juan Manuel de Andrés Almeida, 2010)

Tratamiento de aguas residuales

Los principales destinos de los lodos de depuradora son:

- Valorización de materia:
 - Uso agrícola
 - Compostaje
- Tratamientos térmicos:
 - Incineración
 - Pirólisis
 - Gasificación
 - Oxidación húmeda
- Depósito en vertedero

6. LODOS DE DEPURADORA

Los lodos de depuradora son los residuos generados en las distintas etapas de la depuración de las aguas residuales. Son una mezcla de agua y sólidos separada del agua residual mediante procesos naturales o artificiales. Según los datos del Registro Nacional de Lodos, en España se producen anualmente alrededor de 1.200.000 toneladas (en materia seca, m.s.) de estos subproducto de las depuradoras.

Estos residuos son generados, además de en las estaciones depuradoras que reciben aguas residuales urbanas, en las fosas sépticas y en otras estaciones depuradoras de aguas residuales que tratan aguas de composición similar (principalmente de la industria agroalimentaria).

A continuación se muestra un esquema de la generación y tratamiento de los lodos:

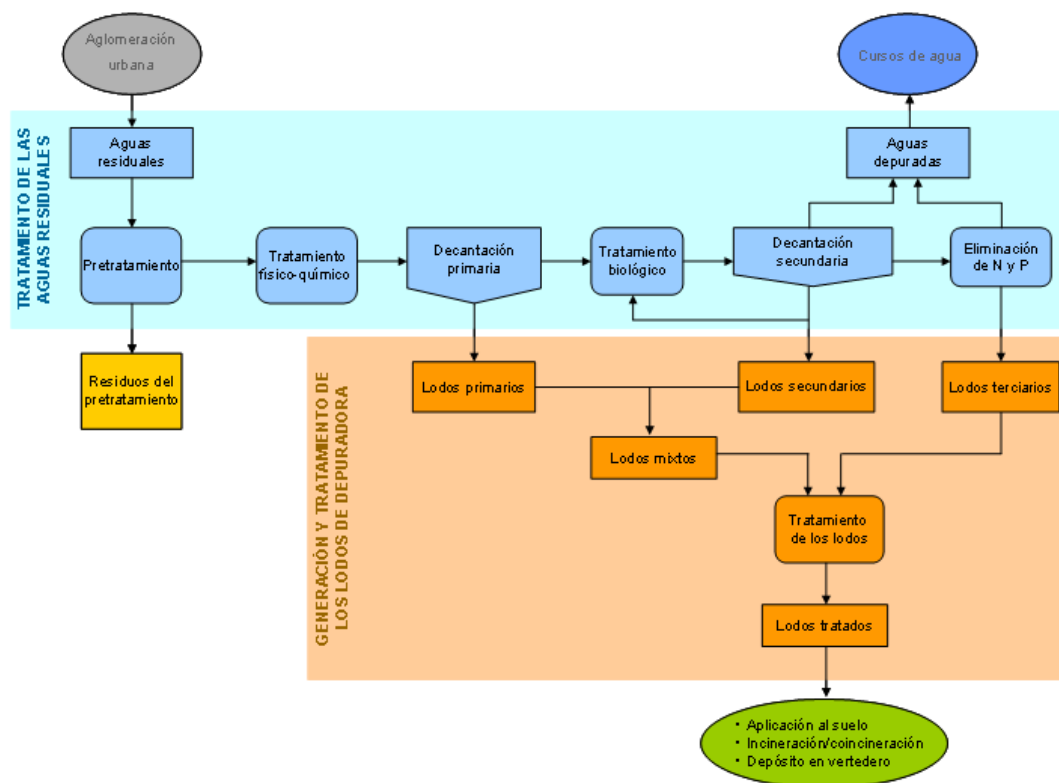


Ilustración 8: Esquema de la generación y tratamiento de los lodos (Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2016)

Tal y como se ve en la imagen superior, los lodos generados en una E.D.A.R. pueden ser de varios tipos:

- Lodos primarios: aquellos que se extraen de los sedimentadores primarios. Consisten principalmente en arena fina, sólidos inorgánicos y sólidos orgánicos.
- Lodos secundarios: aquellos lodos producidos por procesos de tratamiento biológico secundario, lodos activados, filtros rociadores y biodiscos entre otros. Aunque pueden producirse muchas variaciones, todos los lodos secundarios resultan de un tratamiento biológico de aguas residuales.
- Lodos mixtos: son la combinación de lodos primarios y secundarios, que tendrán propiedades aproximadamente proporcionales a la respectiva composición de cada tipo.
- Lodos químicos: aquellos lodos resultantes de agregar sales de aluminio o hierro y/o cal en el tratamiento del agua residual, para mejorar la eliminación de los sólidos en suspensión o para precipitar algún elemento.

6.1. COMPOSICIÓN GENERAL DE LOS LODOS

RESIDUALES URBANOS

Los lodos residuales están compuestos por muchos elementos químicos que varían sus rangos de valores en función del tipo de lodo que sea. Estos elementos químicos son importantes a la hora de considerar el uso final de los lodos procesados. En la siguiente tabla, se pueden ver los rangos de valores y los valores típicos de los elementos químicos que componen los lodos sin tratar y digeridos de una depuradora habitual:

Tabla 10: Composición química y propiedades de lodos sin tratar y digeridos (Cardoso Vigueros, Lina & Ramírez González, Antonio, s. f.)

Concepto	Lodos primarios sin tratar		Lodos primarios digeridos		Lodos secundarios crudos
	Rango	Típico	Rango	Típico	Rango
Sólidos totales secos (ST), %	2.0-8.0	5.0	6.0-12.0	10.0	0.83-1.16
Sólidos volátiles (% de ST)	60-80	65	30-60	40	59-88
Aceites y grasas (% de ST)					
Solubles en éter	6-30	-	5-20	18	-
Extractos de éter	7-35	-	-	-	5-12
Proteínas (% de ST)	20-30	25	15-20	18	32-41
Nitrógeno (N, % de ST)	1.5-4	2.5	1.6-6.0	3.0	2.4-5.0
Fósforo (P ₂ O ₅ , % de ST)	0.8-2.8	1.6	1.5-4.0	2.5	2.8-11.0
Potasio (K ₂ O, % de ST)	0-1	0.4	0.0-3.0	1.0	0.5-0.7
Celulosa (% de TS)	8.0-15.0	10.0	8.0-15.0	10.0	-
Hierro (no como sulfato)	2.0-4.0	2.5	3.0-8.0	4.0	-
Silicio (SiO ₂ , % de ST)	15.0-20.0	6.0	6.0	10.0-20.0	-
pH	5.0-8.0	6.0	6.5-7.5	7.0	6.5-8.0
Alcalinidad (mg/L como CaCO ₃)	500-1,500	600	2,500-3,500	3,000	580-1,100
Ácidos orgánicos (mg/L como HAc)	200-2,000	500	100-600	200	1,100-1,700
Contenido de energía, kJ ST/kg	23,000-29,000	25,000	9,000-14,000	12,000	19,000-23,000

El lodo activado biológicamente acumula metales y compuestos orgánicos, lo cual debe ser considerado como una ventaja teniendo en cuenta el grado de depuración obtenido del agua residual tratada, pero hace que la calidad del lodo dependa, fundamentalmente, de tres grupos de contaminantes principales: metales, contaminantes orgánicos y agentes patógenos. (Ministerio de Fomento, Ministerio de Agricultura y Medio Ambiente, & Centro de Estudio y Experimentación de Obras Públicas, 2013)

Los elementos traza en los lodos son aquellos elementos químicos que, en muy pequeñas cantidades son esenciales para plantas y animales. Algunos ejemplos de elementos traza son el nitrógeno, el fósforo y el potasio, ya que de la concentración de estos elementos es fundamental para saber si un lodo será un buen fertilizante agrícola o no.

Es importante tener en cuenta, que una alta concentración de alguno de estos elementos traza del lodo puede ser perjudicial, llegando a convertir el lodo en un material tóxico imposibilitando, de este modo, su aplicación a suelos (tanto en agricultura como en cualquier otro uso). Los elementos químicos con los que puede suceder esto son los metales pesados.

Tabla 11: Concentración de metales pesados en lodos de una planta de tratamiento de aguas residuales

Metal	Sólidos secos (mg/kg)	
	Intervalo	Media
Arsénico	1.1-230	10
Cadmio	1-3,410	10
Cromo	10-99,000	500
Cobalto	11.3-2,490	30
Cobre	84-17,000	800
Estaño	2.6-329	14
Hierro	1,000-154,000	17.000
Plomo	16-26,000	500
Manganeso	32-9,870	260
Mercurio	0.6-54	6
Molibdeno	0.1-214	4
Niquel	2-5,300	80
Selenio	1.7-17.2	5
Zinc	101-49,000	1.700

6.1.1.1. Propiedades de los lodos secos

Dentro de los objetivos del I Plan Nacional de Lodos (2001-2006), se realizó un amplio estudio de caracterización de lodos de Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales Urbanas (E.D.A.R.U.) de España, analizando 66 plantas, pertenecientes a 16 Comunidades Autónomas, que trataban en su conjunto una población equivalente media de 22.960.092 hab. eq., representando aproximadamente el 75% de la población de la época.

Parte de los resultados de ese estudio fueron publicados en diciembre del 2013 por el Ministerio de Fomento, el Ministerio de Agricultura y Medio Ambiente y el Centro de Estudio y Experimentación de Obras Públicas. En este documento se pueden encontrar las características físicas y químicas medias de los lodos secos de España, establecidas en el estudio de los datos de las 66 depuradoras anteriormente citadas.

Tabla 12: Propiedades físicas de los lodos secos

	Lodos secos
Peso específico	1.64-1.72
Humedad (%)	50-70
Densidad (t/m³)	0.5-0.6
Pérdida al fuego (%)	57.2-60.8
Valor de pH	8.1-5.5
Residuo del tamiz 180 μm (%)	4.0-5.0
Residuo del tamiz 90 μm (%)	80-99.6

Tabla 13: Propiedades químicas de los lodos secos

	Lodos secos
Ca (%)	11.0-13.0
Si (%)	1.3-2.1
Fe (%)	1.7-3.2
Mg (%)	0.7-0.9
Na (%)	0.1-0.22
K (%)	0.1-0.17
P (%)	0.8-1.2

6.2. PRODUCCIÓN DE LODOS

En este apartado, se analiza la producción y el destino de los lodos de depuradoras en distintas unidades territoriales.

6.2.1. Aragón

En Aragón existen 187 Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales Urbanas (Gobierno de Aragón, 2016a, 2016b). Debido a las características demográficas de la Comunidad Autónoma, hay gran variedad de métodos de depuración en las E.D.A.R. Este hecho es debido a que la población de Aragón se concentra en la capital de la comunidad y en unos cuantos núcleos urbanos más, por lo que la población en las zonas rurales, alejadas de estas poblaciones, es mucho menor.

La utilización de métodos menos habituales en grandes ciudades, como pueden ser los filtros percloradores, el lagunaje aireado o el tanque Imhoff, permitieron que la instalación de las depuradoras en esas zonas rurales fuera más económica y adecuada para la población atendida, además permite que el mantenimiento de las mismas sea más sencillo y barato.

Tabla 14: Métodos de depuración de las E.D.A.R. de Aragón (Gobierno de Aragón, 2016a, 2016b)

Método de depuración	Nº de estaciones
Total	187
Biodiscos	7
Fangos activados	1
Fangos activados + digestión anaerobia	1
Fangos activados + digestión anaerobia y eliminación nutrientes	1
Fangos activados doble etapa y digestión aerobia	2
Fangos activados en aireación prolongada	131
Fangos activados en aireación prolongada y eliminación de nutrientes	13
Fangos activados en aireación prolongada y tratamiento terciario	2
Fangos activados en doble etapa	3
Fangos activados en doble etapa y estabilización con cal	1
Fangos activados, espesamiento e incineración y eliminación de nutrientes	1
Filtro percolador	10
Físico-químico, fangos activados y digestión anaerobia	1
Lagunaje aireado	1
Lechos bacterianos	6
Tratamiento primario	5
Tratamiento primario (tanque Imhoff)	1

Nota: Sólo se incluyen las depuradoras públicas de aguas residuales urbanas.

¹Habitantes equivalentes de diseño: estimación de la carga contaminante que las estaciones tienen capacidad

Tabla 15: Producción anual de lodos de depuradora de Aragón y España

Años	Lodos producidos	
	Aragón	España
2012	29.537	1.130.761
2011	28.823	1.108.175
2010	29.753	1.115.803
2009	31.253	1.205.123
2008	31.049	1.156.175
2007	31.985	1.152.585
2006	31.308	1.064.972
2005	29.755	986.086
2004	29.654	1.005.316
2003	30.576	1.012.157
2002	23.233	987.221
2001	23.224	892.238
2000	-	853.482
1999	-	784.882
1998	-	716.145

Unidad: toneladas de materia seca.

En la tabla superior, se pueden observar las producciones anuales de lodos de depuradora de Aragón y de España. Como se ve, la producción de Aragón aumenta los primeros años del s. XXI, esto es debido a la entrada en funcionamiento de muchas depuradoras en la Comunidad Autónoma. Tras este aumento, la producción de lodos de Aragón se estabiliza entre las 29.500 y las cerca de 32.000 toneladas de m.s.

Al igual que en Aragón, la entrada en funcionamiento de mayor número de depuradoras a principios de siglo, hace que crezca la producción nacional de lodos.

6.2.2. España

En España, los destinos más habituales para los lodos de depuradora son el uso de los mismos en agricultura, su incineración para obtener energía y enviarlos a vertedero. En la tabla inferior, podemos ver cómo ha variado la cantidad de lodos en cada destino entre los años 2.008 y 2.012 (último año con datos en el IAEST y en el INE).

Tabla 16: Destino de los lodos de depuradora de España

Año	Producción total	Destino de los lodos de E.D.A.R.			
		Uso agrario	Vertedero	Incineración	Otros
2.012	1.130.761	914.929	80.490	75.258	60.084
2.011	1.108.175	911.087	71.855	62.284	62.950
2.010	1.115.803	923.618	72.187	63.384	56.614
2.009	1.205.124	995.063	95.673	61.602	52.787
2.008	1.176.614	809.502	147.384	43.660	176.068

Unidad: toneladas de materia seca.

En la siguiente tabla, se observa a donde destinó cada Comunidad Autónoma y Ciudad Autónoma los lodos de depuradora generados en su territorio en el año 2.012:

Tabla 17: Destino de lodos de E.D.A.R. en las Comunidades Autónomas y Ciudades Autónomas en el año 2012

Comunidad Autónoma	Producción total	Destino de los lodos producidos			
		Uso agrario	Vertedero	Incineración	Otros
Andalucía	110.109	93.892	14.315	0	1.902
Aragón	29.537	9.106	431	20.000	0
Asturias	2.548	1.688	836	0	25
Illes Balears	44.221	20.796	4.122	0	19.303
Canarias	31.422	0	30.966	0	456
Cantabria	27.800	18.127	3.827	0	5.846
Castilla y León	64.910	60.686	3.929	0	294
Castilla-La Mancha	58.112	51.970	1.132	0	5.009
Cataluña	135.058	107.320	1.231	24.668	1.840
Comunidad Valenciana	198.690	184.583	1.802	163	12.143
Extremadura	14.357	11.423	2.892	0	43
Galicia	110.346	96.318	5.030	2.693	6.305
Madrid	197.345	185.656	5.373	1.234	5.082
Murcia	34.515	33.194	1.098	0	223
Navarra	12.631	12.313	0	0	319
País Vasco	39.138	8.838	3.505	25.518	1.277
La Rioja	19.040	19.022	0	0	19
Ceuta y Melilla (Ciudades Autónomas)	982	0	0	982	0

Unidad: toneladas de materia seca.

6.2.3. *Unión Europea*

La normativa europea que regula la gestión del agua residual urbana y los residuos producidos por esta gestión (lodos de depuradora), estableció que todos los estados miembros de la UE debían tratar sus aguas residuales de forma adecuada. Estableciendo la obligatoriedad de la implantación de estaciones depuradoras en los países que no las tenían en sus poblaciones. Para ello, proporcionó ayudas económicas para la creación de dichas E.D.A.R. (España fue uno de los países que se benefició de estas ayudas).

En las tablas que se pueden ver en este apartado aparecen los 28 países que pertenecen a la Unión Europea, tres de los países que son candidatos a entrar ahora mismo en la UE (Albania, Serbia y Turquía), uno de los países que con candidatos potenciales a formar parte de UE (Bosnia Herzegovina) y tres países del continente europeo pero que no forman parte de la UE (Islandia, Noruega y Suiza).

La primera de las tablas muestra la producción total de lodos de cada uno de los países durante una serie de años:

Tabla 18: Producción anual de lodos de depuradora

GEO/TIME	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Belgium	139,8	:	176,3	:	157,2	:
Bulgaria	42,9	39,4	49,8	51,4	59,3	60,3
Czech Republic	220	207,2	196,3	217,9	263,3	260,1
Denmark	108	108	141	:	141	:
Germany	2.052,6	1.949,9	1.911,5	1.956,6	1.848,9	1.815,5
Estonia	22,2	21,8	18,8	18,3	21,7	18,8
Ireland	103,3	106,8	90	85,7	72,4	64,6
Greece	136,1	151,5	:	147	118,6	:
Spain	1.156,2	1.205,1	1.205,1	:	2.756,6	:
France	1.086,7	:	966,4	:	987,2	886,5
Croatia	:	29,6	30,3	31	42,1	32,1
Italy	:	:	1.102,7	:	:	:
Cyprus	7,5	9,2	8,1	6,8	6,5	:
Latvia	19,3	22,3	21,4	19,7	20,1	22,8
Lithuania	:	:	:	:	45,1	:
Luxembourg	12,8	:	9,7	:	7,7	:
Hungary	172,2	149,3	170,3	168,3	161,7	166,5
Malta	0,1	0,8	1,2	6,1	10,4	9,6
Netherlands	353,2	350,1	351	350,8	346,4	:
Austria	253,5	:	262,8	:	266,3	:
Poland	567,3	563,3	526,7	519,2	533,3	540,3
Portugal	:	344,3	:	:	338,8	:
Romania	79,2	120,5	82,1	114,1	85,4	172,8
Slovenia	20,1	27,3	30,1	26,8	26,1	27,3
Slovakia	57,82	58,58	54,76	58,72	58,71	57,43
Finland	144,2	149	142,7	140,9	141,2	:
Sweden	213,8	212,4	203,5	200,1	207,5	:
United Kingdom	1.813,8	1.760,6	1.419,1	:	1.136,7	:
Iceland	:	:	:	:	:	:
Norway	:	:	:	:	:	:
Switzerland	210	210	:	:	:	194,5
Albania	:	:	:	:	:	:
Serbia	:	:	:	:	:	2.143
Turkey	:	:	:	:	:	:
Bosnia and Herzegovina	0,8	0,7	0,7	0,5	1,2	1,3

Special value:

: Not available

Unit:

Thousand tonnes

Last update

16.02.16

Cada una de las siguientes tablas muestra las cantidades de lodos que los países envían a cada destino final:

Tabla 19: Lodos de depuradora destinados a uso en agricultura

GEO/TIME	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Belgium	18,7	15,5	17,3	:	18,5	:
Bulgaria	11,2	14,2	13,6	17,6	21,2	16,7
Czech Republic	103,1	99	100,6	108,2	72,4	81,1
Denmark	42,9	42,9	74	:	74	:
Germany	580,6	570,4	575,1	565,8	542	491,3
Estonia	2,5	0,4	2,7	0,8	0,5	0,3
Ireland	83,7	66,2	82,7	57,7	68,3	52
Greece	0	0	:	6	14,2	:
Spain	926,9	995,1	995,1	:	1.921,7	:
France	511,7	:	727	:	683,9	368,6
Croatia	:	:	:	:	:	:
Italy	:	:	315,6	:	:	:
Cyprus	5,7	7,9	6,7	3,9	2,8	:
Latvia	5,3	6,7	9,3	8,8	7,5	7,5
Lithuania	:	:	:	:	6,3	:
Luxembourg	4,8	:	5,2	:	3,6	:
Hungary	61,8	63,4	56,8	77,9	15,1	11
Malta	0	0	0	0	0	0
Netherlands	0	0	0	0	0	:
Austria	40,4	:	44,4	:	39,9	:
Poland	112	123,1	109,3	116,2	115	105,4
Portugal	:	226,2	:	:	101,6	:
Romania	0,5	0,1	1,9	1,8	2,2	8
Slovenia	0	0	0,5	0	0	0
Slovakia	0,01	0,01	0,92	0,36	1,25	0,52
Finland	7,8	8,4	7,5	3,8	7,1	:
Sweden	55,6	49,6	50,5	40,4	48,3	:
United Kingdom	:	:	1.118,2	:	844,4	:
Iceland	:	:	:	:	:	:
Norway	68,1	65,6	57,2	63,9	70,1	82,6
Switzerland	6,3	0,6	:	:	:	0
Albania	:	:	:	:	:	:
Serbia	:	:	:	:	:	:
Turkey	:	:	:	:	:	:
Bosnia and Herzegovina	:	:	:	:	:	:

Special value:

: Not available

Unit:

Thousand tonnes

Last update:

16.02.16

Tabla 20: Lodos de depuradora destinados a uso como compost u otras aplicaciones

GEO/TIME	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Belgium	0	0	0	:	:	:
Bulgaria	0	0	0	1,1	5,5	2,3
Czech Republic	69,1	72,6	56,9	72,5	153,7	138,9
Denmark	:	:	:	:	:	:
Germany	386,2	338,4	317,4	315,5	293,5	264,4
Estonia	18,6	17,6	11,5	15,2	14,8	16,3
Ireland	18,9	40,5	7,1	27,7	4,1	9,3
Greece	0	0	:	0	0	:
Spain	:	:	:	:	:	:
France	279,1	:	:	:	:	287,5
Croatia	:	:	:	:	:	:
Italy	:	:	:	:	:	:
Cyprus	0	0	0	0	0	:
Latvia	2	3,3	2,2	1,1	2,1	2,3
Lithuania	:	:	:	:	11,9	:
Luxembourg	3,5	:	:	:	:	:
Hungary	19,5	22,4	22,1	42,7	90,2	93,3
Malta	0	0	0	0	0	0
Netherlands	0	0	0	0	0	:
Austria	57,3	:	83	:	74,2	:
Poland	27,5	23,5	30,9	31	33,3	32,6
Portugal	:	:	:	:	:	:
Romania	2	15,8	1,3	0,2	1,3	0,3
Slovenia	2,3	0,5	0,2	1,9	1,9	2,7
Slovakia	33,46	42,92	35,29	37,6	36,83	35,21
Finland	131,7	136,7	132,4	134,1	92,8	:
Sweden	58,1	:	65,2	:	66,7	:
United Kingdom	:	:	:	:	:	:
Iceland	:	:	:	:	:	:
Norway	23	25,7	23,7	27,9	32,3	29,9
Switzerland	0	0	:	:	:	0
Albania	:	:	:	:	:	:
Serbia	:	:	:	:	:	:
Turkey	:	:	:	:	:	:
Bosnia and Herzegovina	:	:	:	:	:	:

Special value:

: Not available

Unit:

Thousand tonnes

Last update:

16.02.16

Tabla 21: Lodos de depuradora destinados a vertedero

GEO/TIME	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Belgium	0	0	0	:	:	:
Bulgaria	17,8	11,1	14	7,1	6,6	10,5
Czech Republic	27,3	13,4	16,3	14	13,4	17,7
Denmark	1,1	1,1	1,4	:	1,4	:
Germany	2,5	0,9	0	0	0	0
Estonia	1,4	3,7	2,6	2,1	6,5	1,8
Ireland	0,1	0,1	0,2	0,3	0	2,9
Greece	71,6	109,2	:	79,8	40,3	:
Spain	:	:	95,7	:	383,9	:
France	90,2	:	42,3	:	40,2	30,9
Croatia	:	:	:	:	:	:
Italy	:	:	462,2	:	:	:
Cyprus	0	0	0	0	0	:
Latvia	1,8	1,9	1,3	1,1	0,2	0,2
Lithuania	:	:	:	:	0	:
Luxembourg	0	:	0	:	0	:
Hungary	24,8	11,8	1,4	1,7	26,3	12,5
Malta	0,1	0,8	1,2	6,1	10,4	9,6
Netherlands	0	0	0	0	0	:
Austria	21,3	:	20,8	:	13,6	:
Poland	91,6	81,6	58,9	51,4	46,8	31,4
Portugal	:	22,5	:	:	11,4	:
Romania	36	58,1	40,5	53,9	43	117,7
Slovenia	7,8	5	3	2	1,1	0,5
Slovakia	19,44	11,53	6,7	8,25	7,81	6,64
Finland	3,3	3,9	2,8	1,7	9,7	:
Sweden	6,2	:	7,5	:	7,1	:
United Kingdom	:	:	8,8	:	4,7	:
Iceland	:	:	:	:	:	:
Norway	12,8	14,3	8,9	17,9	18,5	18,6
Switzerland	0	0	:	:	:	0
Albania	:	:	:	:	:	:
Serbia	:	:	:	:	:	:
Turkey	:	:	:	:	:	:
Bosnia and Herzegovina	0,8	0,7	0,7	0,5	1,2	1,3

Special value:

: Not available

Unit:

Thousand tonnes

Last update:

16.02.16

Tabla 22: Lodos de depuradora destinados a incineración

GEO/TIME	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Belgium	72,2	67,9	112,7	:	88,8	:
Bulgaria	0	0	0	0	0	0
Czech Republic	2,8	4,6	5,1	6,7	7,7	5,9
Denmark	36,4	36,4	33,8	:	33,8	:
Germany	1.077,6	1.028	1.003,7	1.067,4	1.008,8	1.034,8
Estonia	0	0	:	:	:	:
Ireland	0	0	0	0	0	0
Greece	24,5	40	:	36,3	39,4	:
Spain	:	:	61,6	:	100,5	:
France	205,7	:	180,7	:	207,1	160,6
Croatia	:	:	:	:	:	:
Italy	:	:	36,7	:	:	:
Cyprus	1,8	0,6	0	0	0	:
Latvia	0	0	0	0	0	0
Lithuania	:	:	:	:	0	:
Luxembourg	0,8	:	0,8	:	0,7	:
Hungary	9,4	19,2	19,7	30	24,1	14,1
Malta	0	0	0	0	0	0
Netherlands	335,7	336,6	330,2	331	321,1	:
Austria	91,4	:	114,6	:	138,6	:
Poland	6	8,9	19,8	41,6	56,6	72,9
Portugal	:	:	:	:	0,1	:
Romania	:	0	0	0	0,4	:
Slovenia	6,9	16,9	13,4	15,1	13	14,4
Slovakia	0	0	0	0	3,2	5,01
Finland	1,5	0	0	1,3	31,7	:
Sweden	0,5	:	2,5	:	1,5	:
United Kingdom	:	:	259,6	:	228,9	:
Iceland	:	:	:	:	:	:
Norway	:	:	:	:	:	:
Switzerland	203,7	209,4	:	:	:	188,3
Albania	:	:	:	:	:	:
Serbia	:	:	:	:	:	:
Turkey	:	:	:	:	:	:
Bosnia and Herzegovina	:	:	:	:	:	:

Special value:

: Not available

Unit:

Thousand tonnes

Last update:

16.02.16

7. MARCO JURÍDICO DE LOS LODOS DE DEPURADORA

7.1. LEGISLACIÓN EUROPEA

- Directiva 86/278/CEE relativa a la protección del medio ambiente y, en particular, de los suelos, en la utilización de lodos de EDAR en agricultura.
- 4º Borrador de Directiva sobre aplicación agrícola de lodos.
- Directiva 91/676/CEE, de 12 de diciembre, relativa a la protección de las aguas contra contaminación producida por nitratos de origen agrícola.
- Directiva del Consejo 91/271/CEE de 21 de mayo de 1991, sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas y sus requisitos de vertido.
- Directiva 98/15/CEE que modifica la Directiva 91/271/CEE.
- Reglamento (CE) nº 2003/2003 del Parlamento Europeo y del consejo de 13 de octubre relativo a los abonos.
- Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 19 de noviembre de 2008, sobre los residuos (Directiva Marco de Residuos).
- Directiva 1999/31/CE del Consejo, de 26 de abril de 1999, relativa al vertido de residuos.
- DECISIÓN DEL CONSEJO de 19 de diciembre de 2002 por la que se establecen los criterios y procedimientos de admisión de residuos en los vertederos con arreglo al artículo 16 y al anexo II de la Directiva 1999/31/CEE.
- Directive 2000/76/EC of the European Parliament and of the council of 4 December 2000 on the incineration of waste.
- Directiva 2010/75/UE, del Parlamento Europeo y del Consejo, de 24 de noviembre de 2010, sobre las emisiones industriales (prevención y control integrados de la contaminación).

7.2. LEGISLACIÓN ESPAÑOLA

- Real Decreto 1310/1990 (transposición española de la Directiva 86/278/CEE) por el que se regula la utilización de lodos de depuradora en el sector agrario.
- Orden 26 octubre 1993. Ampliación del R.D. 1310/1990.
- Orden AAA/1072/2013, de 7 de junio, sobre la utilización de lodos de depuración en el sector agrario.
- II Plan Nacional de Lodos de Depuradora de Aguas Residuales (2007-2015).
- Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos (PEMAR), 2016 – 2022.
- Real Decreto 261/1996 relativo a la protección de las aguas contra la contaminación producida por nitratos procedentes de fuentes agrarias.
- Real Decreto Ley 11/1995 de 28 de diciembre, que traspone la Directiva 91/271/CEE.
- Real Decreto 927/1988 que establece los niveles de calidad para las aguas superficiales, dependiendo del uso al que estén destinadas.
- Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados (LRSC).
- Real Decreto 1481/2001, de 27 de diciembre, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero.
- Real Decreto 653/2003, de 30 de mayo, sobre incineración de residuos.
- Real Decreto 815/2013, de 18 de octubre, por el que se aprueba el Reglamento de emisiones industriales y de desarrollo de la Ley 16/2002, de 1 de julio, de prevención y control integrados de la contaminación.
- Real Decreto 506/2013, de 28 de junio, sobre productos fertilizantes.

8. INVESTIGACIÓN SOBRE LOS PROCESOS DE DESHIDRATACIÓN DE FANGOS DE LAS E.D.A.R.

Tal y como se ha explicado en apartados anteriores, la deshidratación es un proceso físico cuyo objetivo es reducir el volumen de los lodos tratando de obtener un material semisólido de mejor manejo en sus posteriores usos. Además, esta reducción de volumen, produce un beneficio económico en la explotación de la E.D.A.R. ya que los costes de transporte y eliminación de los fangos constituyen la carga económica más importante, con diferencia, en el tratamiento de lodos (pudiendo llegar a representar más del 70 por ciento del total). Por tanto, contar con un grupo de deshidratación adecuado se convierte en un criterio decisivo en la gestión eficiente de una EDAR.

Existen dos tipos de deshidratación, la **natural** (aquella que utiliza seres vivos o energías renovables para el proceso) y la **mecánica** (aquella que utiliza máquinas para eliminar el agua). La clave en el éxito de una deshidratación mecánica está en el tipo de acondicionamiento previo, operación que se emplea para mejorar el rendimiento de la deshidratación mecánica. (Agua Industriales, 2014)

8.1. DESHIDRATACIÓN NATURAL

8.1.1. *Humedales artificiales*

Los humedales artificiales son zonas inundadas construidas por el hombre en las que se generan procesos físicos, químicos y biológicos de eliminación de contaminantes que ocurren normalmente en los humedales naturales (TECPA, 2016). Se parecen a lechos de deshidratación de lodos incluyendo macrófitas plantadas, donde los tallos, rizomas y raíces mejoran el drenaje del agua proporcionando canales y favoreciendo la evapo-transpiración (Eco-Lagunas, 2014).

Estos humedales artificiales, pueden ser usados tanto para el tratamiento de aguas residuales como para la deshidratación de los lodos.

Cuando estos sistemas se usan para deshidratación, los lodos de depuradoras se van dosificando a los humedales y, gracias a las plantas, se deshidratan de forma natural, obteniendo rendimientos muy similares a otros sistemas convencionales

Investigación sobre los procesos de deshidratación de fangos de las E.D.A.R.

(centrífugas, filtros-prensa o filtros-banda). El lodo se acumula durante 8-10 años en los humedales, ahorrando los costes energéticos y de transporte durante todo ese tiempo. El producto final es un lodo deshidratado y estabilizado, con lo que deja de ser un residuo peligroso y puede utilizarse perfectamente como enmienda orgánica.

Según Sedaqua (Spin-off de la Universidad de A Coruña), "la inversión en estos humedales de tratamiento de lodos se amortiza a los 4 años, en comparación con sistemas de deshidratación convencionales".

En la tabla inferior se realiza una comparación entre el sistema STRB (Sludge Treatment Reed Beds) de la empresa inglesa ARM Limited y un sistema de deshidratación de lodos mecánico, utilizando como base de la comparación la producción de lodo de la planta de Kolding (Dinamarca):

Tabla 23: Tabla de comparación entre STRB y sistema de deshidratación mecánico (ARM Limited, 2016)

Comparison of Sludge Treatment Reed Bed System with mechanical dewatering plant (Kolding, Denmark 2000 tonne dry solids per annum)			
	AGRICULTURE	REED BED TREATMENT	CENTRAL DRYING / INCINERATION
EMISSIONS			
CO ₂ (tonnes/Year)	157	37	335
NO _x (Kg/Year)	735	235	200.000
SO ₂ (Kg/Year)	~0	~0	10.000
SMELL			
Spreading on Crop Field	YES	NO	n/a
Container transport	YES	NO	YES
Ventilation outlet/smoke	YES	NO	YES
TRAFFIC			
Number of trucks	910	300	1010
EXTERNAL NOISE			
Ventilation + cars	Yes	No	Yes
Other Considerations	Spreading	Emptying	YES
INTERNAL ENVIRONMENT			
Chemical Risks	YES	NO	YES
Heavy Traffic	YES	NO	YES
Dangerous Machines	MEDIUM	FEW	MANY
Noise	MEDIUM	LOW	HIGH
RESIDUAL SUBSTANCES			
Pathogens	YES	NO	NO
Heavy Metals	Unchanged	Unchanged	Fluegas / ash
Hazardous compounds	Unchanged	Reduced	Ash residue

En la tabla superior, se puede ver como en este estudio el sistema STRB obtiene mejores resultados que la deshidratación mecánica.

8.1.1.1. Estructura del humedal artificial

La construcción de un humedal artificial requiere conocimiento técnico y personal cualificado. La estructura fundamental de un humedal se puede resumir en tres partes. Estas partes, pueden tener distintas finalidades en función del uso que se le da al humedal:

- Sustrato o material granular, está compuesto por capas de materiales granulares de distintos tamaños y tiene las siguientes funciones:
 - En el uso del humedal como tratamiento de aguas residuales, tiene la función de soporte a la vegetación y posibilita la fijación de la biopelícula bacteriana que intercede en la gran mayoría de los procesos de eliminación de contaminantes orgánicos de las aguas residuales.
 - En el uso del humedal para la deshidratación de lodos, tiene la función de actuar como filtro de arena y filtro de grava, para permitir que pase el agua a través de él.
- Plantas: en su mayor parte son plantas macrófitas emergentes que intervienen en a la oxigenación del sustrato radical y a la eliminación de contaminantes por absorción.
- Sustancia a tratar:
 - Agua residual: el agua residual con alta carga de contaminación aporta el alimento a las plantas y después de atravesar el humedal pierde esa DBO5 y los sólidos en suspensión. Tras el tratamiento retorna al cauce con unos parámetros de calidad superiores al inicio del tratamiento.
 - Lodo de depuradora: el lodo actúa como soporte de la vegetación proporcionándole alimento. Las plantas, con sus tallos y raíces, crean conductos por los que se filtra el agua favoreciendo la deshidratación del lodo.

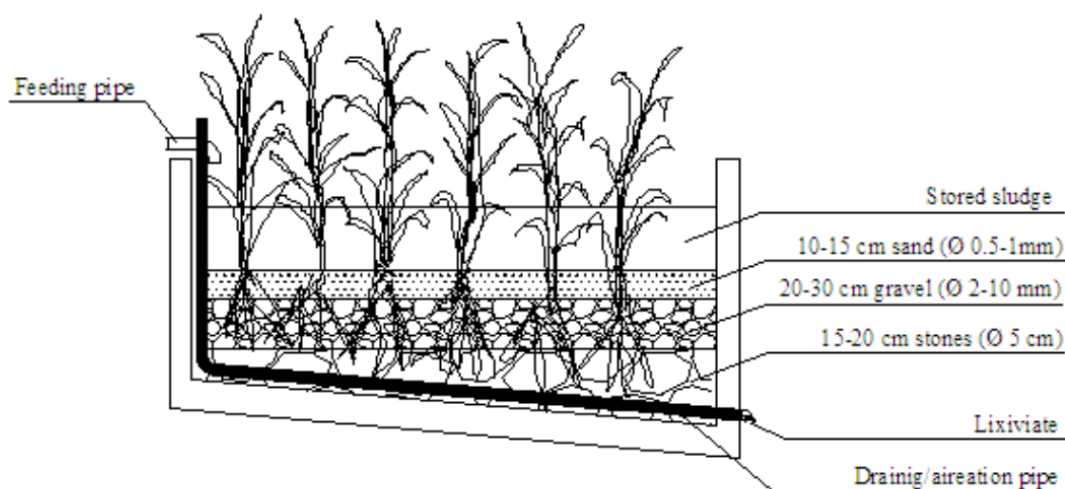


Ilustración 9: Sección de humedal artificial (Enrica Uggetti, 2011)

8.1.1.2. *Ventajas e inconvenientes de los humedales artificiales*

- Ventajas
 - Consumo energético nulo, debido a que el proceso de depuración lo realizan plantas.
 - Integración ambiental excelente, porque sustituye edificios y maquinas por una plantación de macrofitas.
 - Disminución de olores.
 - Facilidad en la explotación. Se reducen las averías al carecer de equipos mecánicos, y la operación es menos complicada, menos peligrosa, y requiere menos medios para mantenerla en su punto óptimo.
 - Programa de mantenimiento más sencillo y fácil de seguir.
- Inconvenientes
 - Este sistema no es adecuado para grandes poblaciones, su uso es preferible para municipios o pequeñas poblaciones de unos 2000 habitantes equivalentes.

- Tarda más tiempo en lograr el régimen óptimo de funcionamiento. Dado que se basa en un sistema natural necesita que las plantas adquieran un grado de madurez y se forme un biotopo natural.
- Un mantenimiento insuficiente en los humedales puede conllevar problemas de colmatación del sustrato.
- Requiere una superficie mayor que los sistemas de depuración convencionales.
- Requiere grandes conocimientos en el diseño, porque después tiene pocas posibilidades de regulación en la operación de la estación depuradora.
- Las plantas pueden ser alimento de ciertos animales, por lo que se debe controlar que no accedan al interior de la parcela.

8.1.2. Sacos filtrantes

El proceso de deshidratación de lodos por medio de sacos filtrantes consiste en la separación de líquidos y sólidos mediante la filtración. Los sacos filtrantes son especialmente recomendados para plantas de tratamiento de pequeñas y medianas poblaciones, hoteles, urbanizaciones y pequeñas industrias. Este sistema no sólo permite deshidratar, sino que también permite embalar y almacenar los lodos de cualquier característica.

La característica más representativa y sobresaliente de este sistema de filtración de fangos es el hecho de que utiliza un continente (el saco) de un material poroso que permite el paso del agua y aire de secado, y simultáneamente evita la colmatación del sólido retenido, y, gracias a sus características estructurales, es resistente a los compuestos químicos, mecánicamente tenaz y reutilizable. El sistema está formado por un bastidor, donde se cuelgan los sacos filtrantes.

La fase de filtración en estos equipos puede ser automática o manual y su llenado se realiza por gravedad o mediante una bomba. La filtración natural del saco puede optimizarse, opcionalmente, aportando aire a una presión de 0,2-0,3 bar por medio de un compresor.



Ilustración 10: Bastidor de llenado de sacos filtrantes

8.1.2.1. Etapas de la deshidratación por medio de sacos filtrantes

- Antes de introducir los fangos puede ser necesaria su floculación o acondicionamiento para mejorar la separación entre las fases sólida y líquida.
- Se introduce el lodo dentro de los sacos. Rápidamente se forma una masa en la parte inferior de los sacos permitiendo un filtrado claro del líquido, que se recoge en el depósito de la parte inferior del módulo y que se conduce a cabecera de la planta.
- Cuando la fase de filtración termina, los sacos están llenos de fangos a una concentración del 10 al 30% de materia seca, entonces son separados del módulo y almacenados al aire libre.
- Durante esta fase de almacenamiento al aire libre, la deshidratación de los fangos continúa de forma natural pudiendo alcanzarse al cabo de 20 días sequedades del orden del 40 - 60 %. Los sacos son de un material que repele el agua, evita que el agua de lluvia entre en él pero permite que salga la de los lodos favoreciendo la deshidratación independientemente de las condiciones meteorológicas.

8.1.2.2. *Ventajas e inconvenientes de los sacos filtrantes*

- Ventajas
 - Bajos costos de operación y mantenimiento.
 - Bajo consumo de energía.
 - Área necesaria muy pequeña para instalación de la maquinaria.
 - Bajos costos de transporte, la masa de lodo se reduce hasta 60 veces.
 - Unidades modulares.
 - Fácil de instalar. Sin trabajos de construcción
 - Fácil de manejar por una sola persona.
 - Seguro para el medio ambiente
- Inconvenientes
 - Este sistema no es adecuado para grandes poblaciones, debido a la gran cantidad de sacos que serían necesarios.
 - Requiere una amplia superficie al aire libre para permitir completar el proceso de deshidratación con los lodos en los sacos.

8.1.3. *Geotubos*

Un geotubo es un tubo largo hecho de geotextiles de alta resistencia especialmente creados para soportar las condiciones extremas del medio ambiente como agua salada, altas temperaturas y exposición prolongada a la luz solar y la intemperie. Son utilizados como medio de separación sólido-líquido, en donde el agua escurre hacia afuera del geotubo y el sólido queda retenido dentro de él (en ocasiones es necesario agregar floculante al agua residual para favorecer la separación sólido-líquido).

En la tabla inferior, podemos ver las características de los geotubos de una determinada marca (DLC Tratamientos de Aguas S.A.):

Propiedad	Valor
Mecánica	
Resistencia a la tracción (agarre)	2670 x 2848 N
Elongación	15 x 15 %
Resistencia a la tracción 5% de deformación	17,5 x 38,5 kN/m
Punción	1155 N
Estallido Mullen	8270+ kPa
Desgarro trapezoidal	1110 x 1335 N
Resistencia	
Resistencia UV	80%
Hidráulico	
Apertura de tamaño aparente	0,425 mm
Permitividad	0,30 seg -1
Caudal de agua	810 L/min/m ²

Ilustración 11: Características de los geotubos de DLC

8.1.3.1. Funcionamiento del geotubo

- Confinamiento: se introducen los lodos a deshidratar en el geotextil fabricando, de este modo, geocontenedores para la deshidratación.
- Drenaje: el exceso de agua drena fuera del geocontenedor a través de los pequeños poros del geotextil, causando una reducción del volumen del material contenido. Esta reducción de volumen permite que el Geocontenedor sea llenado varias veces.
- Consolidación: después del ciclo final de llenado y drenaje, los materiales finos contenidos pueden continuar su consolidación por desecación, ya que el vapor de agua residual sale a través del geotextil.

8.1.3.2. Ventajas e inconvenientes del geotubo

- Ventajas
 - Confinamiento efectivo de grandes volúmenes
 - Reducción en los costos globales de la operación
 - Mínimo impacto en el medio ambiente.
 - Alto rendimiento en separación de sólidos.

- Costos de disposición reducidos.
- Reducción en consumo de energía.
- Gran resistencia.
- No requiere equipos especializados y complejos.
- Fácil instalación.
- Alta relación costo-beneficio en el proceso de deshidratación de lodos.
- Inconvenientes
 - Los geotubos generan un gran impacto visual en la zona que se instalan debido a su gran tamaño.
 - Ocupan una gran superficie de terreno.
 - Debido a su gran tamaño, los geotubos son muy pesados cuando están llenos, por lo que es muy complicado desplazarlos.

8.1.4. Secado solar

La deshidratación de lodos de depuradora mediante la energía solar es un sistema sencillo y seguro, además de ecológico, ya que se basa en energía renovable.

8.1.4.1. Era de secado

Las eras de secado son uno de los métodos más económicos de eliminación del agua de los lodos. Este método suele ser utilizado en comunidades de pequeñas dimensiones y poblaciones de tamaño medio.

En una era de secado, el lodo se deshidrata por drenaje a través de la masa de áridos y por evaporación desde la superficie expuesta al aire (la mayor parte del agua se extrae por drenaje).

La estructura de una era de secado está constituida por dos capas de áridos, una de grava y otra de arena. Bajo estas dos capas de áridos, hay una red de tuberías de drenaje que permiten evacuar fuera de la era el agua deshidratada del lodo por filtración.

Los lodos se extienden sobre las eras de secado con espesores de 20 a 30 cm, dejándose deshidratar hasta alcanzar un contenido de sólidos entre el 30-50%. El periodo de tiempo entre la entrada de los lodos y la recogida del sólido deshidratado

varía entre los 20 y 75 días, según la naturaleza del lodo (con pretratamientos químicos se puede reducir el tiempo de tratamiento hasta en un 50%).

8.1.4.1.1. Funcionamiento de una era de secado

Antes de extender el fango, hay que aflojar la capa de arena apelmazada con un rastrillo de púas de 20 a 30 cm de longitud, que se introducen en la arena y se remueven hacia delante y hacia atrás varias veces, teniendo cuidado de no mezclar las capas de arena y grava. Después de haber realizado esta operación por toda la superficie, hay que deshacer los terrones de arena y nivelar la capa superior de áridos de la era con el mismo rastrillo o arrastrando una tabla con cuerdas para alisar la superficie.

A continuación, ya se puede verter el fango procedente de la depuradora.

Tras el llenado una era de secado, debe limpiarse con agua a chorro la tubería de extracción de agua, para desprender los sólidos que hayan podido adherirse a las paredes de la misma.

Cuando las grietas llegan a la arena, ya puede retirarse el fango deshidratado.

8.1.4.1.2. Ventajas e inconvenientes de una era de secado

- Ventajas:
 - Costo inicial bajo.
 - Requerimientos mínimos de operación y capacitación.
 - Bajo consumo de energía eléctrica.
 - Baja sensibilidad a la variabilidad del lodo.
 - Bajo consumo de químicos.
 - Alto contenido de sólidos en la torta seca.
- Inconvenientes:
 - Requiere de grandes cantidades de terreno.
 - Alta visibilidad al público en general.
 - Impacto del clima sobre el diseño.
 - Requerimiento de lodo estabilizado.
 - Molestia por olores e impacto visual.

- Necesaria numerosa mano de obra para la extracción de los lodos secos.
- Costos de combustibles y equipos para la limpieza del sistema de eras.

8.1.4.2. Secado solar mediante invernaderos

Varias empresas han investigado tratando de aumentar la eficiencia del sistema natural de secado solar de lodos. Las soluciones a las que han llegado la mayoría de ellas son similares, ya que el principio básico de funcionamiento de estos sistemas es la deshidratación del lodo en un invernadero, gracias a la radiación solar incidente.

8.1.4.2.1. Huber SRT

Se trata del sistema de secado solar diseñado por la empresa Huber Technology (Huber Technology España, 2016b). Este sistema, además de utilizar la radiación solar para deshidratar los lodos, utiliza viento generado artificialmente dentro del invernadero para eliminar el agua de los lodos. Para facilitar esta eliminación, posee un sistema especial de volteo que permite la distribución, granulación, volteo, mezclado y retromezclado del lodo.

La ventilación está regulada mediante una continua medición de la capacidad de absorción de agua del aire interno y externo, considerando sus temperaturas, para prevenir una condensación excesiva. El ventilador impulsa aire seco sobre la superficie a deshidratar de lodo fresco y las rejillas de ventilación situadas en el invernadero aseguran el flujo de aire.

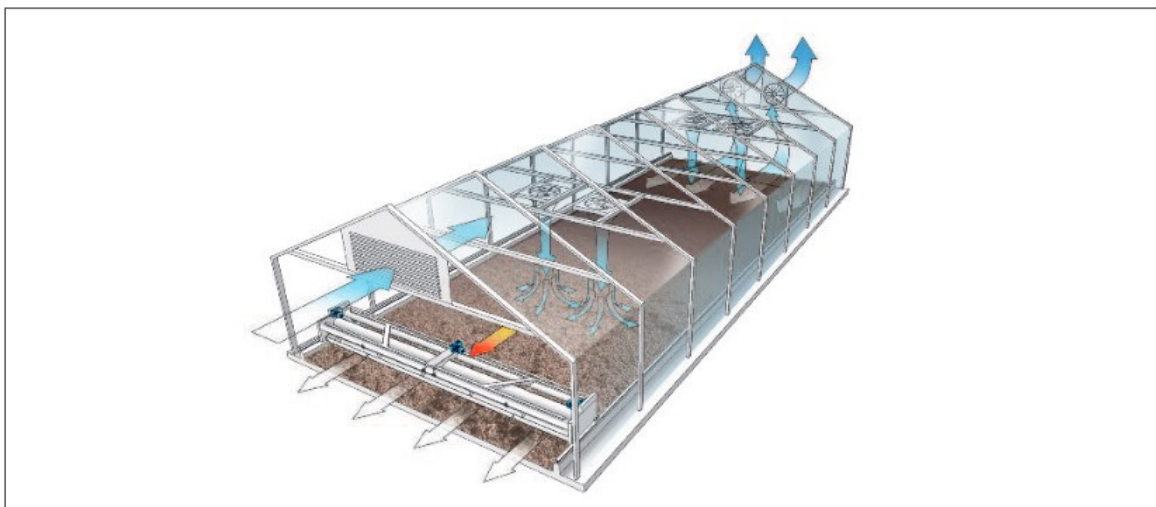


Ilustración 12: Vista general de un invernadero Huber SRT con el flujo de aire y del lodo (Huber Technology España, 2016b)

En la imagen anterior se puede ver como el aire entra en el invernadero por una de las rejillas de ventilación, los ventiladores se encargan de repartirlo por todo el espacio interior y sale por el otro extremo del invernadero. También se aprecia en la ilustración anterior que el lodo entra por un extremo del lodo y sale por el otro.

8.1.4.2.2. Solia Mix

Solia Mix es un sistema de deshidratación de lodos diseñado por la empresa Veolia Water Technologies (Veolia Water Technologies, 2016). Realiza la deshidratación mediante la combinación del secado solar y el secado biológico en el interior de un invernadero continuamente ventilado con aire seco procedente del exterior. El lodo fresco de partida se mezcla con el lodo secado en un ciclo anterior y, a continuación, se extiende en hileras en el invernadero mediante la volteadora automática SOLIAMIX.

El deshidratador de Veolia almacenamiento de lodo en hileras, provocando un incremento de temperatura en el interior de las pilas de lodo, que reduce de manera significativa tanto la cantidad de sólidos a gestionar.

Dependiendo de las necesidades específicas de cada uno de sus clientes, Veolia les proporciona diversas soluciones:

Sistemas de calefacción por suelo radiante o aire caliente, estos sistemas aseguran el rendimiento de la deshidratación durante todo el año. Además, permite reducir la superficie necesaria para la implantación del invernadero así como la duración del ciclo, manteniendo la capacidad de tratamiento bajo condiciones climáticas adversas.

ACoDry, gestión inteligente de la ventilación, analiza y procesa los factores clave que influyen en el proceso (humedad, temperatura, radiación solar y características del lodo de partida), adaptando la intensidad de la ventilación de forma que el consumo de energía eléctrica se reduzca al mínimo necesario para alcanzar el nivel de sequedad objetivo.

Tratamiento eficiente de olores, Veolia ofrece distintas soluciones en función de los condicionantes locales y de las características particulares de los lodos.

8.1.4.2.3. Heliantis

Este sistema de secado solar está diseñado por la empresa Suez Environnement (Suez Environnement, 2016b). Transforma cualquier tipo de lodos en un producto granulado seco, con un contenido de sólidos secos que puede ajustarse en un rango

de 35% a 85%. Usando el sol como fuente de energía principal, el lodo se deshidrata en un invernadero y una máquina escarificadora gira y rompe el lodo en gránulos de carbono neutral e inodoro, para su eventual reutilización agrícola o de producción de energía térmica mediante la co-incineración.

El deshidratador Heliantis está compuesto por los siguientes elementos:

- Losa plana: sobre ella se repartirán los lodos a deshidratar.
- Invernadero: cubre toda la superficie que será cubierta por el lodo a deshidratar y tiene unas aberturas en el techo por las que entra el aire para la ventilación.
- Ventiladores: encargados de realizar la ventilación forzada del invernadero cuando esta sea necesaria.
- Rodillo escarificador: gira sobre el lodo beneficiando la aireación y deshidratación del mismo.

El funcionamiento de este deshidratador consta de las siguientes fases:

- Los lodos deshidratados se llevan de la depuradora al invernadero.
- El escarificador giratorio gira repetidamente el lodo, rompiéndolo en gránulos y moviéndolo gradualmente hacia delante.
- Como la cama de lodo es calentada por el sol, el agua que contiene se evapora.
- El aire húmedo se evacua para mantener los niveles de humedad óptima en el invernadero.

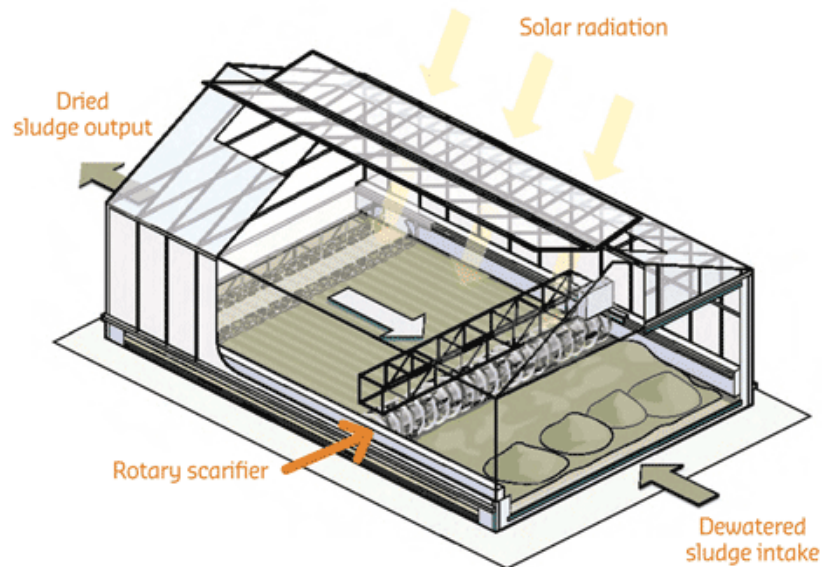


Ilustración 13: Diagrama de proceso de Heliantis (Suez Environnement, 2016b)

8.2. DESHIDRATACIÓN MECÁNICA

8.2.1. Centrífugas

Los fangos de depuradora se pueden separar en dos fases (un líquido sobrenadante clarificado y un sedimento homogéneo) mediante la aplicación de una fuerza centrífuga. Para facilitar esta separación, es indispensable la adición de un polímero para acondicionar el fango.

La máquina reposa sobre un bastidor de lastre que a su vez se apoya en el suelo mediante amortiguadores potentes. Una carcasa sirve de protección contra la rotación a gran velocidad del recipiente. En el interior de la carcasa, está el tornillo giratorio que da vueltas a una velocidad ligeramente superior a la del recipiente gracias a un reductor de velocidad.

8.2.1.1. Etapas de la deshidratación con centrífugas

- El fango acondicionado se introduce en el equipo.
- Un distribuidor giratorio reparte el fango hacia la periferia y lo impulsa en el espacio anular entre la cubeta y el tornillo.
- Por el efecto de la fuerza centrífuga, las partículas pesadas decantan y se depositan contra la pared interior de la cubeta. El tornillo transportador raspa las partículas y las envía en continuo hacia la parte cónica.

- Los sedimentos compactados en el cono son evacuados por un extremo y recogidos en una tolva de descarga.
- La alimentación continua empuja el líquido que se evacua hacia la zona de recogida de efluentes mediante colectores regulables.

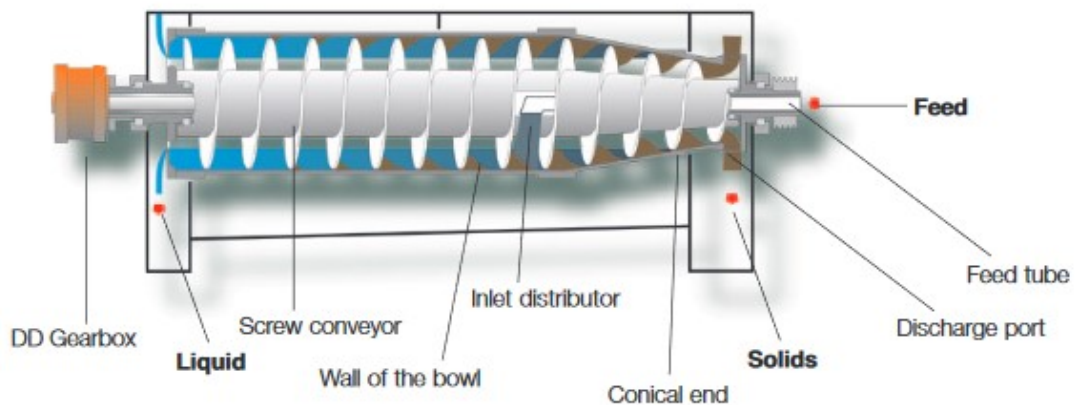


Ilustración 14: Sección de una centrífuga (Alfa Laval, 2015c)

8.2.1.2. *Parámetros de diseño*

En la deshidratación mediante centrífugas, no hay un parámetro de diseño establecido, pero los valores utilizados para seleccionar un equipo u otro para el proceso de deshidratación de una EDAR son:

- Caudal de alimentación.
- Capacidad de alimentación.
- Consumo energético máximo.

8.2.1.3. *Ventajas e inconvenientes de las centrífugas*

- Ventajas
 - Ocupa poco volumen, en comparación con otros sistemas de deshidratación.
 - Gran rendimiento de deshidratación.
 - Funciona en continuo.

- Inconvenientes
 - Uso de gran cantidad de polímero
 - Consumo energético elevado
 - Ruido elevado
 - Mantenimiento especializado

8.2.2. Filtros banda

Estos sistemas utilizan bandas continuas montadas horizontalmente sobre las que se descarga y deshidrata el lodo.

En un filtro banda el prensado no se realiza en un recinto cerrado, el propio fango asegura la estanqueidad lateral bajo la presión que puede soportar durante su avance. Si la presión es muy alta, se destruye la cohesión de la capa de fango y se produce una fuga con salida lateral del fango parcialmente deshidratado. La eficacia de la deshidratación depende de la presión que se aplique sobre la torta de fango y del tiempo de prensado. (Giner, 2016)

8.2.2.1. Etapas de la deshidratación con filtros banda

La deshidratación con filtros banda tiene las siguientes etapas:

- Floculación: la mayoría de los lodos residuales requieren de la adición de poli electrolitos orgánicos para conseguir la floculación y una primera y rápida separación de la mezcla.
- Predeshidratación: la primera etapa de la separación se realiza en la zona de deshidratación, donde buena parte del filtrado drena por gravedad a través de la banda.
- Filtración: la filtración se realiza en la zona donde la banda pasa entre tambores perforados y rodillos con diámetros decrecientes recorriendo una traza en forma de "S".
- Compactación y escurrido: la compactación y escurrido de la torta se consigue cuando las dos bandas y la torta pasan a la zona de alta presión donde la presión y fuerza de cizalladura que se transmite alcanza su máximo valor.

- Descarga: para la descarga de los sólidos deshidratados se consigue separando las dos bandas y colocando en cada una de ellas una cuchilla longitudinal que impide que ningún trozo quede sin descargarse.
- Limpieza: para evitar el ensuciamiento de la banda asociada a una reducción gradual de sus prestaciones, se realiza un lavado continuo y a presión de todo su ancho.

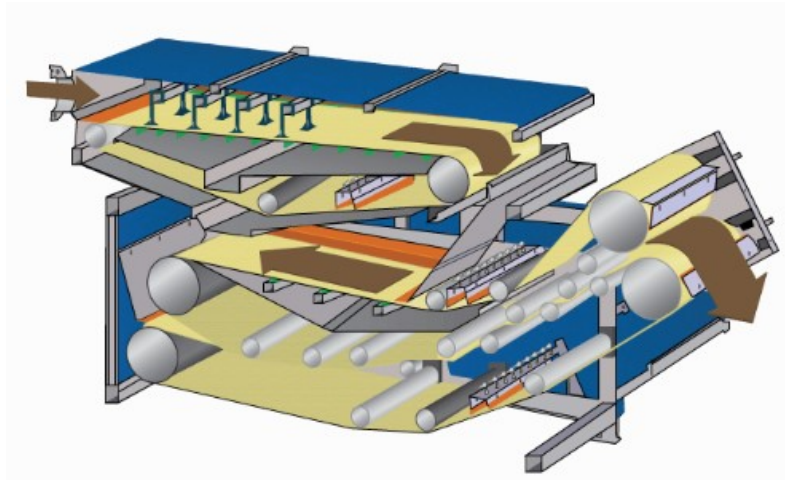


Ilustración 15: Esquema de flujo de un filtro banda (FRC Systems International, 2015)

8.2.2.2. *Parámetros de diseño*

En la deshidratación de lodos con filtros banda, el parámetro de referencia es la carga por metro lineal de ancho de la banda. Un valor medio que suele establecerse es 250 kg/m/h para un ancho de banda de 2.50 metros.

Adicionalmente, se tienen en cuenta otros parámetros a la hora de la elección de un equipo:

- Caudal máximo de agua de limpieza.
- Consumo energético máximo.

8.2.2.3. *Ventajas e inconvenientes de los filtros banda*

- Ventajas:
 - Es un sistema simple de operar.
 - Trabaja en continuo.
 - Tiene una baja demanda de energía eléctrica.

- Inconvenientes:
 - Posibles molestias debidas a la vibración (en el caso de que se use para aumentar la eficiencia del sistema).
 - Alto consumo de productos químicos (floculantes).
 - Resistencia de la tela. Si se produce algún agujero, pierde eficiencia.
 - Amortización de los consumibles.

8.2.3. Filtros prensa

El filtro prensa es un dispositivo de separación sólido-líquido que funciona según el principio de filtración a alta presión mediante un medio filtrante de malla relativamente tupida.

8.2.3.1. Elementos de un filtro prensa

Estos tipos de filtros se componen de los siguientes elementos:

- Batería de cámaras de filtración, cada una de estas cámaras de filtración están formadas por:
 - Placas verticales, huecas y yuxtapuestas.
 - Telas filtrantes de mallas bastante tupidas (10 a 300 μ m), cubren las dos superficies acanaladas de las placas.
- Gato hidráulico, es el encargado de generar la presión que una cabeza móvil transmitirá a las cámaras de filtración. El empuje del conjunto es contenido por una cabeza fija situada en el otro extremo.
- Unos conductos internos evacuan el agua filtrada de la máquina para mandarla al inicio de la depuradora para su tratamiento.

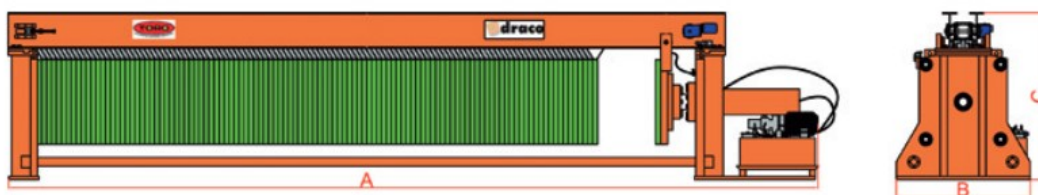


Ilustración 16: Filtro prensa (Toro Equipment, 2015)

8.2.3.2. Etapas de la deshidratación con filtros prensa

El filtro prensa tiene un funcionamiento discontinuo, funciona por prensados sucesivos. Cada prensado supone:

- Cierre de la prensa para apretar las placas entre ellas.
- Llenado del filtro, el tiempo de este llenado varía en función de la filtrabilidad del fango.
- Filtración, de 30 a 45 minutos para permitir alcanzar la presión máxima provocada por la llegada continua de fango y la formación de una capa de fango filtrado cada vez más espesa.
- Evacuación, durante la cual las tortas formadas caen por su propio peso cuando las cámaras se abren. Esta fase requiere la presencia de un operador, ya que las tortas son más o menos pegajosas y hace falta intervenir con una rasqueta para garantizar su evacuación completa.
- Limpieza, fase indispensable para garantizar el correcto funcionamiento del filtro. Se ha de limpiar tanto la tela como las ranuras de evacuación del filtrado.

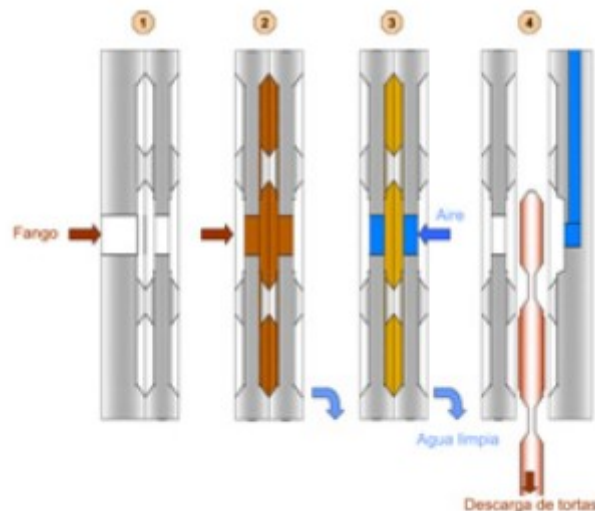


Ilustración 17: Funcionamiento de un filtro prensa (1 - Cierre del filtro prensa; 2 - Llenado; 3 - Filtración; 4 - Apertura)

8.2.3.3. Parámetros de diseño

En la deshidratación mediante filtros prensa no existen parámetros de diseño específicos, los valores que se tienen en cuenta para escoger un filtro prensa, además de la tipología del fango, son:

- Duración máxima del ciclo:
 - Duración de la carga.
 - Duración del prensado.
 - Duración de la descarga.
- Espesor de la tora.
- Consumo energético máximo.
- Limpieza:
 - Frecuencia de limpiezas al año.
 - Caudal de agua máximo por limpieza.

8.2.3.4. Ventajas e inconvenientes de los filtros prensa

- Ventajas
 - Amplia superficie de filtración.
 - Se obtiene una alta sequedad del lodo.
 - Tolerancia a varios tipos de lodos.
 - Consume poca energía
 - Poco consumo de productos químicos.
- Inconvenientes
 - No suelen ser usados para la deshidratación de lodos de depuradora urbana, ya que estos lodos son muy pegajosos y no se suelen desprender bien las tortas.
 - Funcionamiento por ciclos, por tanto, discontinuo.
 - Velocidad de alimentación disminuye gradualmente durante el ciclo.
 - Inversión elevada.

8.2.4. Filtros rotativos de vacío

En los filtros de vacío la separación sólido-líquido tiene lugar gracias a la aspiración que imprime una bomba de vacío bajo la superficie en la que se encuentra el lodo a deshidratar.

8.2.4.1. Funcionamiento de un filtro rotativo de vacío

El tejido poroso está colocado sobre un tambor cilíndrico que gira sobre su eje. El cilindro es sumergido parcialmente en un depósito que contiene el fango a deshidratar, a medida que el cilindro gira se recubre de fango.

Entonces, se hace el vacío mediante unas bombas exteriores y el agua pasa al centro del cilindro de donde es extraída. El fango deshidratado es retirado de la tela filtrante (por insuflación de aire comprimido y rascador, por sistema de hilos o cadenas, por rodillo prensor, por sistema de tela saliente o por medio de un rascador) y recogido por una cinta transportadora.

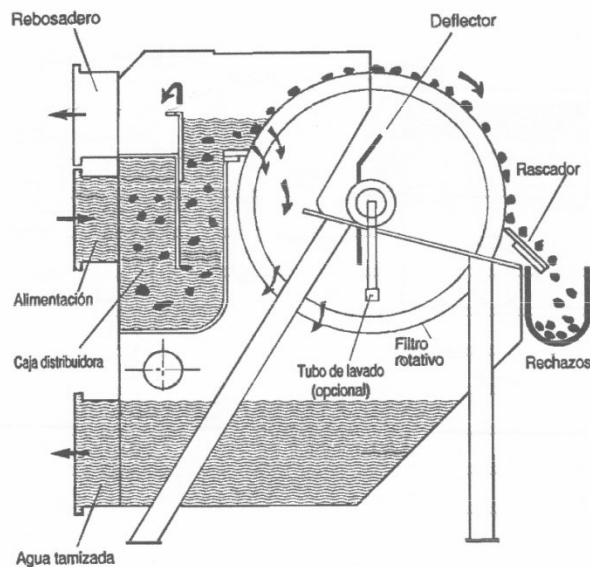


Ilustración 18: Filtro rotativo de vacío

8.2.4.2. Etapas de la deshidratación con filtros rotativos de vacío

- Formación de la torta
- Filtración-deshidratación
- Descarga de la torta

8.2.4.3. Ventajas e inconvenientes de los filtros rotativos de vacío

- Ventajas:
 - Tiene un funcionamiento continuo.
 - Baja necesidad de mano de obra.
- Inconvenientes:
 - Nivel bajo de captación de sólidos.
 - Elevada humedad en la torta.
 - Alto consumo energético
 - El equipo puede sufrir daños por abrasión y/o oxidación.

8.2.5. Tornillos deshidratadores

El tornillo deshidratador es un equipo que realiza en una sola operación varias funciones del proceso de depuración: el transporte, la deshidratación y la compactación de lodos provenientes de plantas de tratamiento aguas residuales urbanas o industriales, minimizando su contenido de humedad y su volumen.

8.2.5.1. Funcionamiento de un tornillo deshidratador

El tornillo rota lentamente de forma que transmite y consolida el fango. El tamaño de los discos y la distancia entre ellos se adaptan en función del tipo de lodo a tratar y los objetivos que se quieran alcanzar.

El tambor se compone de una serie de discos fijos y móviles, que aseguran la deshidratación y espesado del lodo. La presión realizada por un disco fijo situado al final de la descarga regula el proceso.

Mediante la rotación, el tornillo produce el deslizamiento de los discos móviles entre los discos fijos, este movimiento raspa el lodo y lo mueve hacia el final del tambor, al mismo tiempo se libera el agua filtrada hacia el exterior.

El elemento filtrante se divide en tres zonas diferentes: zona de drenaje, espesado, y de prensa. Cada una de estas zonas se encuentra perforada con agujeros de diferente tamaño, siendo ésta una característica necesaria a fin de alcanzar el máximo drenaje de agua filtrada. La baja velocidad de giro del tornillo garantiza una

operación de deshidratación suave y apacible. La torta se va expulsando de manera continua.

Gracias a la combinación de los discos y el tornillo, el tambor se va autolimpiando automáticamente y no necesita ningún lavado o sistema de desatascado del equipo.

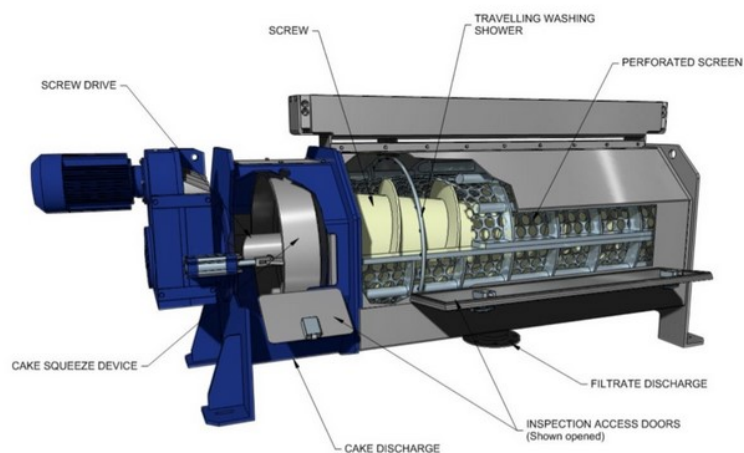


Ilustración 19: Tornillo deshidratador (Ernesto Herrera Díaz, 2016)

8.2.5.2. Ventajas e inconvenientes de los tornillos deshidratadores

- Ventajas:
 - Operación continua, segura y totalmente automática.
 - Alto grado de deshidratación del fango.
 - Bajo nivel de ruido, inferior a 65 dB.
 - Ausencia de vibraciones.
 - La potencia requerida para su accionamiento es muy baja.
 - Requiere muy poca agua de lavado.
- Inconvenientes:
 - Coste de la inversión inicial.
 - Necesidad de personal especializado para el mantenimiento del sistema.
 - Inversión en productos químicos.
 - Grandes periodos de tiempo en funcionamiento.

9. ESTUDIO ECONÓMICO DE LOS PROCESOS DE DESHIDRATACIÓN UTILIZADOS EN LAS ESTACIONES DEPURADORAS

9.1. BASES DEL ESTUDIO ECONÓMICO

En el presente apartado, se explican y analizan los distintos elementos que se tendrán en cuenta en el estudio económico que se realiza sobre los procesos de deshidratación de lodos utilizados en las depuradoras investigadas.

Este estudio tiene en cuenta los costes de inversión inicial de maquinaria, los costes de explotación de la misma (coste de la energía eléctrica consumida) y la amortización de las máquinas. Por el contrario, no abarca el análisis de los costes de personal (debido a la complejidad de estimar la cantidad de operarios que se encargan del proceso de deshidratación en las depuradoras estudiadas, ya que hay una gran variedad en el tamaño de las mismas), los costes de mantenimiento de las máquinas (por no adentrarse en la multitud de variables que existirían si se estudiara el costo de los recambios de las máquinas y la mano de obra destinada al mantenimiento), ni los costes de acondicionamiento de los lodos previo a la deshidratación.

9.1.1. Conjuntos de estudio

En este estudio, se analizan dos conjuntos de estudios diferentes. Se optó por esta decisión ante la posibilidad de no poder obtener los datos necesarios para completar la investigación en alguno de los dos campos. A continuación se detallan las localidades que abarca cada uno de los conjuntos de estudio:

- Conjunto de Estudio 1:

En este conjunto de estudio se encuentran las depuradoras de las capitales de provincia de mayor población de España. Se querían estudiar las depuradoras de las diez capitales de mayor población, pero al no obtener datos fiables sobre las depuradoras de Las Palmas de Gran Canaria se descartó esta ciudad y se incluyó a Alicante en el estudio. De

este modo, las depuradoras que quedan dentro del Conjunto de Estudio 1 son:

Tabla 24: Depuradoras del Conjunto de Estudio 1

Población	Nombre de la E.D.A.R.
Alicante	Rincon de León
	Monte Orgegia
Barcelona	Sant Adrià del Besòs
	El Prat de Llobregat
Bilbao (Sestao)	Galindo
Madrid	Butarque
	China
	Gavia
	Rejas
	Sur
	Sur Oriental
	Valdebebas
Málaga	Viveros de la Villa
	Guadalhorce
Málaga	Peñón de Cuervo
	Murcia Este
Murcia	Murcia Este
	Palma 1
Palma de Mallorca	Palma 2
	San Jerónimo
Sevilla	Tablada
	Copero
	Ranilla
Valencia	Pinedo 1
	Pinedo 2
Zaragoza	Almozara
	La Cartuja

- Conjunto de Estudio 2:

En este conjunto de estudio, se analizan las depuradoras de las localidades de la Comunidad Autónoma de Aragón (salvo las de la ciudad de Zaragoza, estas dos depuradoras se tienen en cuenta en el Conjunto de Estudio 1). Debido a la distribución demográfica de los habitantes de Aragón hay poblaciones en las que habita muy poca gente, por lo que no se han tenido en cuenta dichas localidades para este estudio (se han seleccionado las depuradoras que trataban aguas con una media de carga contaminante máxima mensual superior a 2000 habitantes equivalentes

en el año 2015). De este modo, las depuradoras que quedan dentro del Conjunto de Estudio 2 son:

Tabla 25: Depuradoras del Conjunto de Estudio 2

Depuradoras	
Huerva	Mallén
Monzón	Utrillas
Barbastro	Cella
Alcañiz	Gallur
Fraga	Monreal del Campo
La Almunia de Doña Godina	Pina de Ebro
Tarazona	Almudevar
Caspe	El Burgo de Ebro
Sabiñánigo	Daroca
Binefar	Quinto de Ebro
Andorra	Albalate del Arzobispo
Alagón	Ateca
Tauste	Grañén
Borja - Ainzón - Maleján	Plaza
Illueca - Brea	Montalbán
Pedrola	Alcorisa
La Muela	Ejea de los Caballeros
Villanueva de Gállego	Mequinenza
Fuentes de Ebro	Calatayud
Épila	Cariñena
Calamocha	Huesca
Sariñena	Jaca
Calanda	Zuera - San Mateo
Tamarite de Litera	Teruel
Graus	

Con la finalidad de obtener unos datos de partida fidedignos, se elaboraron unas encuestas que se enviarían a las distintas depuradoras que se deseaban estudiar. Dados los dos campos de estudio que se analizan, se confeccionaron dos encuestas diferentes una destinada a las depuradoras del Conjunto de Estudio 1 (Anexo I) y otra destinada a las del Conjunto de Estudio 2 (Anexo II).

Se enviaron las encuestas a todas las depuradoras, empresas que las gestionan y/o administraciones públicas que están al cargo de las mismas. En el caso del Conjunto de Estudio 1, únicamente respondieron a la encuesta las depuradoras de Barcelona, Bilbao y Zaragoza. La información correspondiente al resto de depuradoras se ha obtenido gracias a una profunda búsqueda bibliográfica. En cambio, respecto a

las depuradoras del Conjunto de Estudio 2, el Instituto Aragonés del Agua (Gobierno de Aragón, 2016b) facilitó los datos de todas las EDAR.

9.1.2. Maquinaria

El presente apartado es uno de los apartados más importante de este análisis económico, ya que aquí se justifica la elección de los sistemas de deshidratación y las máquinas que se estudiarán.

9.1.2.1. Maquinaria existente en las depuradoras

El primer paso de la selección de equipos de deshidratación de lodos para el estudio económico es conocer la maquinaria que hay implantada actualmente en las depuradoras a estudiar.

9.1.2.1.1. Depuradoras del Conjunto de Estudio 1

Tabla 26: Maquinaria de las depuradoras del Conjunto de Estudio 1

Nombre de la E.D.A.R.	Equipo instalado
Rincon de León	Centrífuga
Monte Orgegia	Centrífuga
Sant Adrià del Besòs	6 centrífugas
El Prat de Llobregat	4 centrífugas
Galindo	6 filtros prensa
Butarque	3 centrífugas
China	S/D
Gavia	4 centrífugas
Rejas	3 centrífugas y 1 filtro banda
Sur	8 centrífugas y 3 filtros banda
Sur Oriental	S/D
Valdebebas	2 centrífugas y 1 filtro banda
Viveros de la Villa	3 centrífugas
Guadalhorce	Centrífuga
Peñón de Cuervo	Centrífuga
Murcia Este	Centrífuga
Palma 1	4 centrífugas
Palma 2	No hay, se envían los lodos a
San Jerónimo	Centrífuga y filtro banda
Tablada	Centrífuga y eras de secado
Copero	Centrífuga y filtro banda
Ranilla	4 centrífugas
Pinedo 1	Centrífuga
Pinedo 2	Centrífuga
Almozara	2 centrífugas
La Cartuja	Centrífugas

Estudio económico de los procesos de deshidratación utilizados en las estaciones depuradoras

Tal y como se observa en la tabla anterior, las depuradoras del Conjunto de Estudio 1 tienen instaladas centrífugas, filtros banda, filtros prensa y eras de secado como equipos de deshidratación de lodos.

Es importante señalar que los equipos indicados en la tabla no están siempre en funcionamiento, lo normal es que las depuradoras con mucha maquinaria instalada utilicen parte de ella como equipo de reserva.

9.1.2.1.2. Depuradoras del Conjunto de Estudio 2

Tabla 27: Maquinaria de las depuradoras del Conjunto de Estudio 2

Depuradoras	Equipo instalado	Depuradoras	Equipo instalado
Huerva	Centrífuga	Mallén	Centrífuga
Monzón	Centrífuga	Utrillas	Centrífuga
Barbastro	Centrífuga	Cella	Centrífuga
Alcañiz	Centrífuga	Gallur	Centrífuga
Fraga	Centrífuga	Monreal del Campo	Centrífuga
La Almunia de Doña Godina	Centrífuga	Pina de Ebro	Centrífuga
Tarazona	Centrífuga	Almudevar	Centrífuga
Caspe	Centrífuga	El Burgo de Ebro	Centrífuga
Sabiñánigo	Centrífuga	Daroca	Centrífuga
Binefar	Centrífuga	Quinto de Ebro	Centrífuga
Andorra	Centrífuga	Albalate del Arzobispo	Centrífuga
Alagón	Centrífuga	Ateca	Centrífuga
Tauste	Centrífuga	Grañén	Centrífuga
Borja - Ainzón - Maleján	Centrífuga	Plaza	Centrífuga
Illueca - Brea	Centrífuga	Montalbán	Filtro banda
Pedrola	Centrífuga	Alcorisa	Centrífuga y filtro banda
La Muela	Centrífuga	Ejea de los Caballeros	Centrífuga y filtro banda
Villanueva de Gállego	Centrífuga	Mequinenza	Centrífuga
Fuentes de Ebro	Centrífuga	Calatayud	Centrífuga
Épila	Centrífuga	Cariñena	Centrífuga
Calamocha	Centrífuga	Huesca	Centrífuga
Sariñena	Centrífuga	Jaca	Centrífuga
Calanda	Centrífuga	Zuera - San Mateo	Centrífuga
Tamarite de Litera	Centrífuga	Teruel	Centrífuga
Graus	Centrífuga		

Como se puede ver en la tabla superior, la mayoría de las depuradoras del Campo de Estudio 2 utilizan centrífugas en sus procesos de deshidratación. Sólo hay tres poblaciones que tienen otro tipo de máquinas Montalbán, Alcorisa y Ejea de los Caballeros.

9.1.2.2. Selección de la maquinaria para el estudio

9.1.2.2.1. Procesos de deshidratación a estudiar

El primer paso para la elección de la maquinaria con la que se realizará el estudio, es determinar los procesos de deshidratación que se investigarán.

Teniendo en cuenta la descripción de la maquinaria instalada en las depuradoras a estudiar y la investigación realizada sobre los distintos procesos de deshidratación, todo ello reflejado en apartados previos de este documento, se pasa a determinar cuáles serán los procesos que se estudiarán.

Se descarta el uso en el estudio de los procesos de deshidratación natural debido a las amplias extensiones de terreno necesarias para su implantación (secado solar, geotubos y humedales artificiales), a lo influenciado que está alguno por las condiciones climáticas de la zona (eras de secado) o la baja productividad que pueden alcanzar (sacos filtrantes). Respecto a los procesos de deshidratación mecánica, se descartan los filtros rotativos de vacío (debido a su alto consumo de energía eléctrica) y los tornillos deshidratadores (por su baja productividad).

Debido a las razones expuestas en el párrafo superior, los procesos de deshidratación que se analizarán en este estudio son:

- Centrífugas
- Filtros banda
- Filtros prensa

Es importante destacar que, pese a que los filtros prensa tienen la desventaja de que su uso no es del todo adecuado con lodos urbanos, se ha decidido incluirlos en el estudio debido a su bajo consumo de energía eléctrica y a que es uno de los procesos utilizados actualmente en una de las depuradoras a estudiar (Galindo).

9.1.2.2.2. Empresas fabricantes

- Centrífugas
 - Hi-Toper

Empresa líder en la producción de equipos de filtración y centrifugación, que marca la pauta a seguir dentro de la industria china. Esta empresa fue creada en 1997 y sus talleres de

Estudio económico de los procesos de deshidratación utilizados en las estaciones depuradoras

producción ocupan 250.000 metros cuadrados. Actualmente comercian de forma activa con más de 200 empresas en más de 30 países.

Sus filtros y separadores son utilizados con mucha frecuencia para la separación de sólidos y líquidos en industrias como la alimenticia, industria de bebidas, industria minera, industria textil, industria de la cerámica, industria metalúrgica, el tratamiento de aguas residuales y la protección medio ambiental.

- Andreu Boet

Andreu Boet Equipaments es una empresa que se dedica a la venta y el alquiler de unidades móviles de deshidratación de fangos, en base a centrífugas decantadoras con capacidades de tratamiento que van desde los 3 m³/h hasta los 90 m³/h de caudal hidráulico.

La empresa, con sus soluciones móviles y fijas de deshidratación de fangos da servicio en toda Europa y en América del Sur.

- ASEPH

Empresa española con sede en Madrid, considerada el primer fabricante nacional de centrífugas-decanters. La fabricación íntegra de los equipos se realiza en España e Italia, siendo el capital social 100% español.

Sus centrífugas se utilizan en la depuración de aguas residuales, las industrias alimentaria, farmacéutica, ganadera y petroquímica, en la minería y en la realización de sondeos.

- Filtros banda

- Ekotuotanto

Empresa finlandesa especializada en el desarrollo y fabricación de equipos para el tratamiento de agua y aguas residuales. Sus principales productos son los filtros banda, espesadores de banda para espesamiento de lodos y unidades de preparación de polímero en polvo. Operan principalmente a través de representantes locales que garantizan un buen servicio al cliente final.

- FRC

FRC es una empresa americana fundada en 1979 como un proveedor de equipos para tratamiento de aguas residuales en la industria de alimentos. Con el crecimiento en el número de proyectos y base de clientes, FRC comenzó a desarrollar y fabricar su propia línea de sistemas para el tratamiento de aguas residuales.

- Filtros prensa

- TORO Wastewater Equipment Ind.

Toro Equipment es una de las principales compañías europeas especializada en el diseño y fabricación de equipos para el tratamiento de aguas residuales industriales y urbanas, aguas de proceso, aguas de abastecimiento, reutilización de aguas y tratamiento de lodos.

En la actualidad ofrece soluciones personalizadas tanto en el sector privado como en el sector público. Sus equipos se han suministrado en más de 50 países del mundo.

- AMP S.L.

Advanced Mineral Processing S.L. es una empresa española con sede en Madrid. Está especializada en ingeniería de proceso y diseño de equipos y plantas para numerosas industrias, como minería metálica, minerales industriales, carbón, áridos, química, reciclaje y medio ambiente.

Por su herencia industrial proveniente de su participación en un sinfín de proyectos, el equipo técnico de AMP está plenamente capacitado para ofrecer un amplio rango de soluciones de ingeniería eficiente y rentable en el procesamiento y deshidratación de minerales metálicos, arenas y otros materiales.

- Innovation Huayi

Empresa china fundada en el año 2009 especializada en máquinas de tratamiento de aguas residuales, filtros prensa para la deshidratación de lodos, incineradores de residuos y máquinas de flotación de aire disuelto.

9.1.2.2.3. Modelos de los equipos

En la tabla inferior aparecen los modelos de los equipos seleccionados para analizar en el estudio:

Tabla 28: Modelos de equipos deshidratadores a analizar en el estudio

Fabricante	Equipo	Modelo	Capacidad	Consumo eléctrico	Precio
Hi-Toper	Centrífuga	LW 355	15 m ³ /h	41 Kw	48.350 €
Hi-Toper	Centrífuga	LW 710	30 m ³ /h	55,5 Kw	63.900 €
Andreu Boet	Centrífuga	SC 3-0	15 m ³ /h	40 Kw	50.000 €
Andreu Boet	Centrífuga	S 3-2	30 m ³ /h	65 Kw	62.500 €
Andreu Boet	Centrífuga	S 3-03	40 m ³ /h	90 Kw	79.500 €
Andreu Boet	Centrífuga	S 5-1	90 m ³ /h	160 Kw	154.500 €
ASEPH	Centrífuga	AD39 XL	35 m ³ /h	75 Kw	75.000 €
ASEPH	Centrífuga	AD50 LH	60 m ³ /h	125 Kw	125.000 €
Ekotuotanto	Filtro banda	BF 1.1 P	7 m ³ /h	2,75 Kw	68.000 €
Ekotuotanto	Filtro banda	BF 2.1 P	15 m ³ /h	4,5 Kw	74.500 €
Ekotuotanto	Filtro banda	BF 2.6 P	35 m ³ /h	6,2 Kw	88.200 €
FRC	Filtro banda	PC-16	7 m ³ /h	2,95 Kw	66.900 €
FRC	Filtro banda	NPD-16XL	15 m ³ /h	4 Kw	75.000 €
FRC	Filtro banda	FPD-16	30 m ³ /h	7,5 Kw	95.900 €
FRC	Filtro banda	FPD-21	40 m ³ /h	10,75 Kw	104.000 €
FRC	Filtro banda	FPD-26	60 m ³ /h	13,75 Kw	116.800 €
TORO W.E.Ind.	Filtro prensa	FPA 120	1,03 m ³ /ciclo	4 Kw	80.000 €
TORO W.E.Ind.	Filtro prensa	FPA-AR 1000	3,22 m ³ /ciclo	7,5 Kw	100.000 €
AMP S.L.	Filtro prensa	FP 1500	8,56 m ³ /ciclo	10,5 Kw	128.000 €
AMP S.L.	Filtro prensa	FP 2000	14,38 m ³ /ciclo	15,3 Kw	140.000 €
Xinhai	Filtro prensa	XmaZ 710/2000U	14,13 m ³ /ciclo	16 Kw	132.200 €
Xinhai	Filtro prensa	XmaZ 1060/2000U	21,2 m ³ /ciclo	24,5 Kw	146.700 €

9.1.3. Lodos

Con la finalidad de que este estudio económico sea veraz, se trabaja con datos reales de la producción de lodos de las depuradoras. Esa fue la razón por la que se enviaron las encuestas.

Para realizar el estudio de la maquinaria, se partirá de la producción anual de lodos frescos de las depuradoras del año 2015. En unos casos esta información ha sido facilitada en las encuestas de las depuradoras y, en otros casos, ha sido necesaria una búsqueda bibliográfica para poder obtenerla.

Otro de los datos necesario de los lodos para poder realizar los cálculos pertinentes en este estudio, es la concentración de los mismos. Se trata de una

característica de los lodos cuyo valor no es constante y depende, en gran parte, del tratamiento previo que ha tenido el lodo en la depuradora. Su magnitud suele oscilar entre los 20 y los 34 g/l. Por ello, para los cálculos necesarios en este análisis, se ha seleccionado un valor medio de 25 g/l para la concentración de los lodos.

9.1.4. Estimación de los costes de explotación

Los costes de explotación de las máquinas se han denominado en este estudio económico como "Coste diario", entendiendo este concepto como el importe, en euros, de la energía eléctrica consumida por el equipo de deshidratación de lodos durante las horas que está en funcionamiento para deshidratar la cantidad de lodo correspondiente a cada día.

Para poder determinar el coste diario de la deshidratación de cada depuradora dependiendo del equipo utilizado, es necesario determinar una serie de valores:

- Cantidad diaria de lodos a deshidratar: este dato se obtiene de la encuesta de cada depuradora o de una búsqueda bibliográfica.
- Concentración de los lodos frescos antes de deshidratar: para la realización de este estudio, se ha fijado un valor de 25 g/l.
- Características del equipo:
 - Capacidad de la máquina: cantidad de lodo que es capaz de tratar el equipo en una hora.
 - Consumo eléctrico de la máquina: energía eléctrica necesaria para que el equipo funcione una hora.
- Horas en funcionamiento del equipo cada día: cantidad de tiempo que debe estar trabajando la máquina para deshidratar los lodos correspondientes a cada día. Este valor se obtiene del siguiente modo:

$$\text{Horas de funcionamiento} = \frac{\text{Lodos diarios a deshidratar}}{\text{Capacidad del equipo}}$$

- Precio de la electricidad: para establecer el precio del Kw industrial se ha recurrido a datos oficiales de la Unión Europea (Eurostat, 2016). Se seleccionó el valor medio del Kw industrial de España del año 2015 (0.1116 €/Kw).

Una vez conocidos los datos anteriores, ya es posible calcular el coste diario. Para ello, se realiza la siguiente operación:

$$\text{Coste diario} = \text{Horas de funcionamiento} * \text{Consumo eléctrico del equipo} * \text{Precio del Kw}$$

Las tablas en las que aparecen los datos y los cálculos necesarios para determinar el coste diario de las máquinas para cada depuradora están recogidas en el Anexo IV.

9.1.5. Amortización

La amortización es la expresión de la depreciación sistemática y efectiva sufrida por el inmovilizado, por su aplicación al proceso productivo. Es decir, la amortización representa la pérdida de valor de la infraestructura necesaria para el funcionamiento de la empresa (Pablo Herrero, 2012).

Este concepto sirve para reflejar en el balance anual de la empresa el cambio de valor que van sufriendo los elementos del inmovilizado de los que dispone la empresa por el hecho ejercer su actividad.

Se pueden utilizar diferentes métodos para el cálculo de la amortización, en función de la naturaleza del bien y del uso al que se destine. Existen tres métodos entre los que se ha de elegir:

- Constante: se aplica el método constante en elementos que pierden su valor por igual a lo largo de su vida útil.
- Degresiva: se aplica el método degresivo en elementos que pierden más valor al principio de su vida útil.
- Progresiva: se aplica el método progresivo en elementos que pierden menos valor al principio de su vida útil.

La elección del método de amortización para cada elemento del inmovilizado debe ajustarse de manera fiel a su curva de pérdida de valor y no debe cambiarse el método durante la vida del mismo.

Independientemente del método de amortización que se elija, se han de tener en cuenta una serie de conceptos imprescindibles para la realización del cálculo:

- Vida útil del inmovilizado, tiempo durante el cual se espera utilizar el activo en la empresa.

- Valor residual, valor que se estima que podría tener el inmovilizado al final de su vida útil.
- Base de amortización, es la diferencia entre el coste inicial y el valor residual.
- La fecha de inicio del proceso de amortización es la de puesta en marcha del elemento de inmovilizado.

Para realizar el cálculo de la amortización de la maquinaria seleccionada en el presente estudio económico, se ha seleccionado el método de amortización constante. Se ha optado por esta elección debido al tipo de máquinas que son y a recomendaciones recibidas tanto por fabricantes de las mismas como por gestores de depuradoras.

Las recomendaciones citadas anteriormente, también sirvieron para establecer el valor residual de las máquinas en el 10% del valor inicial y para fijar su vida útil. Este último dato aparece reflejado en la tabla inferior:

Tabla 29: Vida útil de la maquinaria

Vida útil de la maquinaria	
Centrífugas	15 años
Filtros banda	25 años
Filtros prensa	20 años

Los cálculos de la amortización de cada una de las máquinas pueden encontrarse en el Anexo V.

9.2. RESULTADOS

9.2.1. Conjunto de Estudio 1

El cálculo de los costes de explotación de los equipos estudiados para las depuradoras de este conjunto, aparece recogido dentro del Anexo IV.

Las tablas correspondientes a este conjunto de depuradoras muestran que estas instalaciones tienen una producción tan grande de lodos a deshidratar, que no es posible tratarla con una única máquina.

Con el fin de obtener el grupo de maquinaria de deshidratación con menores costes de explotación, se va a calcular el "Consumo diario" de varios equipos de

Estudio económico de los procesos de deshidratación utilizados en las estaciones depuradoras

deshidratación instalados en depuradoras de este conjunto de estudio. Para determinar dicho valor, se parte de los siguientes datos:

- Depuradoras del Conjunto de Estudio 1 de las que se conocen todos los datos del proceso de deshidratación (tipo de procesos instalados, cantidad de máquinas y capacidad de dichas máquinas).
- Al no saber todos los datos de consumo energético de la maquinaria instalada en las depuradas (este dato es necesario para el cálculo del "Consumo diario", tal y como se ha explicado en apartados anteriores), se utilizará la maquinaria de este estudio económico que tenga la misma capacidad que la instalada en las E.D.A.R.
- Para poder comparar los consumos diarios que se obtengan de los cálculos, se parte de la misma cantidad de lodos a deshidratar en un día. Este valor se fija en 2.749 m³ de MF que es la media de la producción diaria de lodos de las depuradoras del Conjunto de Estudio 1.
- El coste de la electricidad, al igual que en apartados anteriores, es de 0.1116 €/Kw.

Tabla 30: Consumo diario de los equipos de deshidratación instalados en depuradoras

Depuradora	Producción diaria de lodos (m ³ MF)	Equipo instalado	Nº Equipos	Capacidad	Horas en marcha por día	Consumo diario por máquina (€)	Consumo diario total (€)
Sant Adrià del Besòs	2.749	Centrífuga	6	60 m3/h	7,64	106,54 €	639,22 €
El Prat de Llobregat	2.749	Centrífuga	4	60 m3/h	11,46	159,80 €	639,22 €
Galindo	2.749	Filtro prensa	6	8,6 m3/ciclo	53,54	62,74 €	376,45 €
Butarque	2.749	Centrífuga	2	40 m3/h	22,91	230,12 €	679,40 €
			1	35 m3/h	26,18	219,16 €	
Gavia	2.749	Centrífuga	4	30 m3/h	22,91	141,91 €	567,63 €
Rejas	2.749	Centrífuga	3	30 m3/h	22,91	141,91 €	444,90 €
		Filtro banda	1	30 m3/h	22,91	19,18 €	
Sur	2.749	Filtro banda	3	30 m3/h	8,33	6,97 €	500,08 €
		Centrífuga	3	60 m3/h	4,17	58,11 €	
			3	35 m3/h	7,14	59,77 €	
			2	40 m3/h	6,25	62,76 €	
Valdebebas	2.749	Centrífuga	2	30 m3/h	30,55	189,21 €	403,99 €
		Filtro banda	1	30 m3/h	30,55	25,57 €	
Viveros de la Villa	2.749	Centrífuga	2	30 m3/h	30,55	189,21 €	400,33 €
			1	35 m3/h	26,18	21,92 €	
Palma 1	2.749	Centrífuga	4	30 m3/h	22,91	141,91 €	567,63 €
Ranilla	2.749	Centrífuga	4	40 m3/h	17,18	172,59 €	690,36 €

En la tabla superior, se puede ver que la maquinaria indicada para algunas de las depuradoras (Galindo, Butarque, Valdebebas y Viveros de la Villa) es insuficiente para tratar la cantidad de lodos diaria establecida para el cálculo. Esto quiere decir que la información que se posee de estas depuradoras es incorrecta e irreal (ya sea el origen de ésta las encuestas o la búsqueda bibliográfica), porque la cantidad de lodos a tratar utilizada en el cálculo es menor que la que realmente se deshidrata en las depuradoras.

El equipo de deshidratación con consumo diario más bajo es el instalado en la depuradora de Rejas. Este equipo está formado por tres centrífugas y un filtro banda de 30 m³/h cada uno y el precio del consumo energético de este equipo es de 444,9 €/día.

De todos los conjuntos de maquinaria que aparecen en la tabla, el equipo de la Depuradora Sur ha sido seleccionado como la instalación más adecuada. Esta elección

está basada en que es el grupo de maquinaria que aúna el bajo consumo diario y la necesidad de pocas horas de funcionamiento para deshidratar los lodos generados.

9.2.2. Conjunto de Estudio 2

El cálculo de los costes de explotación de los equipos estudiados para las depuradoras de este conjunto, aparece recogido dentro del Anexo IV.

En las tablas recogidas en este anexo, se observa que los filtros prensa estudiados no son viables en la mayoría de los casos debido a su capacidad, ya que precisan más ciclos diarios de los que son posibles realizar. Sólo sería posible el uso del filtro prensa FP 1500 de AMP S.L. para aquellas depuradoras que deshidraten 60 m³ diarios de lodo o menos.

En el caso de los filtros banda estudiados, sólo es posible el uso de los equipos de 7 m³/h de capacidad para las E.D.A.R. que deshidraten un máximo de 135 m³ diarios de lodo fresco. Para los equipos de 15 m³/h de capacidad, el límite máximo superior se sitúa en torno a los 300 m³ diarios de lodo a tratar. Esto es así, porque una cantidad mayor de lodo no podría ser tratada en un único día.

Las centrífugas estudiadas son viables para todas las depuradoras del Conjunto de Estudio 2, excepto para las de Ejea de los Caballeros y Huesca. Estas dos poblaciones tienen una producción superior a la que pueden tratar los equipos estudiados en un solo día.

10. CONCLUSIONES

El proceso de deshidratación de una depuradora varía en función del tamaño de ésta, por lo que la maquinaria destinada a la deshidratación de lodo fresco en una instalación que produce 200 m³ diarios de lodo fresco es distinta a la de una que genera 3.000 m³. Por esta razón, en este trabajo se establecen dos conjuntos de estudio gracias a los cuales se analizan mejor las situaciones de las principales estaciones depuradoras de aguas residuales (E.D.A.R.) de España y en particular, Aragón.

El Conjunto de Estudio 1 está formado por las depuradoras de las capitales de provincia de mayor población. Estas E.D.A.R. tratan diariamente un volumen promedio de agua cercano a los 94.000 m³, por lo que una de sus consecuencias es la generación de una alta cantidad de lodos a deshidratar. La cuantía de estos lodos hace que no sea posible su tratamiento con un único equipo, así que los procesos de deshidratación de éstas requieren disponer de varias máquinas para poder hacer frente al volumen diario de lodos generados.

Tal y como se ha expuesto anteriormente en este documento, la instalación más optimizada para la deshidratación de lodos es la instalada en la Depuradora Sur de Madrid. Esta instalación está compuesta por un grupo de tres filtros banda (de 30 m³/h cada uno) y ocho centrífugas (tres de ellas de 60 m³/h, otras tres de 35 m³/h y las dos últimas de 40 m³/h). El hecho de que se divida la carga de trabajo en once equipos deshidratadores, junto con las pocas horas diarias de funcionamiento necesarias, permite que el desgaste por trabajo de los equipos sea menor que en otras hipótesis estudiadas.

El Conjunto de Estudio 2 está formado por las E.D.A.R. de Aragón que trataron aguas con una media de carga contaminante máxima mensual superior a 2000 habitantes equivalentes en el año 2015.

Una vez analizadas las tablas del estudio económico del Conjunto de Estudio 2 (Anexo IV) y la amortización de los distintos equipos (Anexo V), se puede decir que el alto precio de los filtros prensa y de los filtros banda no permite que estos equipos sean amortizados por las depuradoras de este grupo que generan un volumen de lodos a deshidratar no muy elevado.

Conclusiones

En apartados anteriores de este trabajo, se ha indicado que las centrífugas son los equipos de deshidratación que tienen mejor relación/precio para las E.D.A.R. del Conjunto de Estudio 2.

Con la finalidad de adecuar lo máximo posible la elección de la centrífuga en función de la producción de lodo de la depuradora, se relaciona en la tabla inferior el volumen de lodos a deshidratar con la capacidad de la centrífuga:

Tabla 31: Capacidad de una depuradora en función del volumen de lodo a deshidratar

Volumen de lodos a deshidratar	Capacidad de la centrífuga
De 0 a 100 m ³	15 m ³ /h
De 100 a 230 m ³	30 m ³ /h
De 230 a 320 m ³	40 m ³ /h
Más de 320 m ³	Centrífuga de más de 40 m ³ /h o dos centrífugas de menor capacidad

Del estudio económico de los equipos de deshidratación de lodos del Conjunto de Estudio 2 se extrae que la condición limitante para la elección del equipo es la baja producción de lodo que tienen las E.D.A.R. de Aragón. Esta limitación podría salvarse uniendo el proceso de deshidratación de varias depuradoras cercanas en una de ellas logrando, de este modo, aumentar la cantidad de lodo a deshidratar. Este aumento permitiría instalar equipos deshidratadores de mayor capacidad o incluso, instalar grupos de equipos de deshidratación (tal y como se realiza en las E.D.A.R. del Conjunto de Estudio 1), lo que permitiría completar el proceso de la deshidratación con una mejor relación rendimiento/precio.

11. BIBLIOGRAFÍA

A. Flaga. (2005). Sludge drying. En *Proceedings of Polish-Swedish seminars, Integration and optimization of urban sanitation systems. Cracow March* (pp. 17–18).

Recuperado a partir de <http://rymd.lwr.kth.se/forskningsprojekt/Polishproject/rep13/Flagasludgedrying73.pdf>

Acero Oliete, Alejandro Jesús, & Lorén Zaragozano, Francisco Javier. (2014a). Tema 7.1: Introducción y espesamiento de fangos en depuradoras.

Acero Oliete, Alejandro Jesús, & Lorén Zaragozano, Francisco Javier. (2014b). Tema 7.2: Estabilización de fangos de depuradora.

Acero Oliete, Alejandro Jesús, & Lorén Zaragozano, Francisco Javier. (2014c). Tema 7.3: Deshidratación y evacuación de fangos.

Advanced Mineral Processing. (2016). Filtros Prensa. Recuperado 8 de marzo de 2016, a partir de <http://www.ampmineral.com/equipos/filtros-prensa.php>

Aema. (2014, abril 28). Centrifuga para tratar fangos de aguas residuales industriales. Recuperado 8 de marzo de 2016, a partir de <http://aguasindustriales.es/como-seleccionar-la-mejor-centrifuga-para-tratar-fangos-de-aguas-residuales-2/>

Agència Catalana de l'Aigua. (2016a). aca_ Depuradoras en servicio. Recuperado 13 de febrero de 2016, a partir de http://aca-web.gencat.cat/aca/appmanager/aca/aca?_nfpb=true&_pageLabel=P1225554461208201540084

Bibliografía

Agència Catalana de l'Aigua. (2016b). EDAR de Vallvidrera. Recuperado 5 de mayo de 2016, a partir de http://www.aiguesdebarcelona.cat/documents/2950762/0/triptic_EDAR_Vallvidrer_a_11.pdf/d997c7df-2e16-4609-9a78-43b468660c5f

Agència Catalana de l'Aigua. (2016c). EDAR del Baix Llobregat. Recuperado 5 de mayo de 2016, a partir de http://www.aiguesdebarcelona.cat/documents/2950762/0/triptic_EDAR_Baix_Llobregat_31.pdf/c7e34639-1fc0-4164-b113-911aa1b1f7ed

Agència Catalana de l'Aigua. (2016d). EDAR del Besòs. Recuperado 5 de mayo de 2016, a partir de http://www.aiguesdebarcelona.cat/documents/2950762/0/triptic_EDAR_Besos_19.pdf/1d79b415-4e44-466c-92f6-1e802a9796a5

Aguas Industriales. (2014, abril 24). Centrifuga para tratar fangos de aguas residuales industriales. Recuperado 31 de octubre de 2016, a partir de <http://aguasindustriales.es/como-seleccionar-la-mejor-centrifuga-para-tratar-fangos-de-aguas-residuales/>

Alfa Laval. (2015a). AlfaLaval_AS-H Plate Press. Recuperado 8 de marzo de 2016, a partir de <http://www.alfalaval.es/products/separation/filters-and-strainers/AS-H-Plate-Press/>

Alfa Laval. (2015b). AlfaLaval_Belt press. Recuperado 8 de marzo de 2016, a partir de <http://www.alfalaval.es/products/separation/filters-and-strainers/Belt-press/>

Alfa Laval. (2015c). AlfaLaval_Decanters. Recuperado 8 de marzo de 2016, a partir de <http://www.alfalaval.es/products/separation/centrifugal-separators/Decanters/>

- AMP. (2016). Catalogo_filtroprensa AMP15.pdf. Recuperado a partir de http://www.ampmineral.com/downloads/Catalogo_filtroprensa_AMP15.pdf
- ANDRITZ. (2016, marzo 2). Andritz Ingenieria_Filterpresses [text]. Recuperado 14 de marzo de 2016, a partir de <https://www.andritz.com/index/separation/se-downloads.htm#mech>
- ARM Limited. (2016). SLUDGE TREATMENT WETLANDS. Recuperado 1 de noviembre de 2016, a partir de <http://www.armreedbeds.co.uk/resources/constructed-wetlands/sludge-treatment-wetlands/>
- ASEPH Decanter S.A. (2016a). ASEPH Decanter - Decantadores y Poli-Preparadores. Recuperado 8 de marzo de 2016, a partir de <http://www.asephdecanter.com/>
- ASEPH Decanter S.A. (2016b). Decanters - Fichas técnicas. Recuperado 8 de marzo de 2016, a partir de <http://www.asephdecanter.com/work/decanter-fichas-tecnicas/>
- Avilés Flores, Martha, & Montellano Palacios, Leticia. (s. f.). Identificación de sistemas de desinfección de aguas residuales. Recuperado 21 de abril de 2016, a partir de <http://www.conagua.gob.mx/conagua07/noticias/desinfeccion.pdf>
- Ayuntamiento de Madrid. (2016). Estaciones regeneradoras de aguas residuales - Ayuntamiento de Madrid. Recuperado 5 de mayo de 2016, a partir de <http://www.madrid.es/portales/munimadrid/es/Inicio/Medio-ambiente/Estaciones-regeneradoras-de-aguas-residuales?vgnextfmt=default&vgnextoid=00124eff905ae210VgnVCM2000000c205a0aRCRD&vgnnextchannel=3edd31d3b28fe410VgnVCM1000000b205a0aRCRD>

Bibliografía

Blumberg Engineers. (2014, abril 24). Secado de fangos » Blumberg Engineers Ecotechnologies. Recuperado 1 de noviembre de 2016, a partir de <http://blumberg-engineers.com/es/78/secado-de-fangos>

Calderón Mólgora, César G. (s. f.-a). Identificación de sistemas naturales para el tratamiento de aguas residuales. Recuperado 21 de abril de 2016, a partir de http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Noticias/Sistemas_naturales.pdf

Calderón Mólgora, César G. (s. f.-b). Identificación de sistemas primarios para el tratamiento de aguas residuales. Recuperado 21 de abril de 2016, a partir de http://www.conagua.gob.mx/conagua07/noticias/sistemas_primarios.pdf

Calderón Mólgora, César G. (s. f.-c). Identificación de sistemas secundarios para el tratamiento de aguas residuales. Recuperado 21 de abril de 2016, a partir de http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Noticias/Sistemas_secundarios.pdf

Cardoso Vigueros, Lina, & Ramirez González, Antonio. (s. f.). Identificación de sistemas de tratamiento de lodos residuales. Recuperado 21 de abril de 2016, a partir de <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Noticias/lodosresiduales.pdf>

Chamorro, J. (2016, septiembre 12). Depuración para principiantes VI-2: Datos de diseño de la línea de fangos. Balance de masas - Blog [Text]. Recuperado 18 de septiembre de 2016, a partir de <http://www.iagua.es/blogs/jorge-chamorro/depuracion-principiantes-vi-2-datos-diseno-linea-fangos-balance-masas>

Comunidad de Madrid. (2005). PLAN_REGIONAL_LODOS_DEPURADORA.pdf. Recuperado a partir de <http://www.madrid.org/cs/Satellite?blobcol=urldata&blobheader=application%2Fpdf&blobheadername1=Content->

Disposition&blobheadervalue1=filename%3DPLAN_REGIONAL_LODOS_DEPURADORA.pdf&blobkey=id&blobtable=MungoBlobs&blobwhere=1196173052015&ssbinary=true

CONICET. (2011). Eutrofización. Recuperado 19 de abril de 2016, a partir de <http://www.cricyt.edu.ar/enciclopedia/terminos/Eutrofizac.htm>

Consorcio de Aguas Bilbao Bizkaia. (2013). Ciclo del agua, Consorcio de Aguas Bilbao Bizkaia. Recuperado 15 de febrero de 2016, a partir de <https://www.consorciodeaguas.com/Web/CicloAgua/ciclodelagua.aspx?id=depuracion>

Cosme. (s. f.). Cosme - Machines for waste water treatment - Trattamento fanghi. Recuperado 30 de agosto de 2016, a partir de <http://www.cosmeitalia.com/eng/np.php>

DAM Depuración de Aguas del Mediterráneo. (2016a). DAM Aguas. Recuperado 15 de febrero de 2016, a partir de http://www.dam-aguas.es/serv_edars.php?id=106&habitantes=&provincia=3&caudal=

DAM Depuración de Aguas del Mediterráneo. (2016b). Depuradoras, DAM Aguas. Recuperado 15 de febrero de 2016, a partir de http://www.dam-aguas.es/serv_edars.php?id=125&habitantes=&provincia=&caudal=

Degrémont. (2016a). Degrémont Iberia - Deshidratación. Recuperado 8 de marzo de 2016, a partir de <http://www.degremon.es/es/index.php/tecnologias-del-agua/fangos-tec-tec/deshidratacion-fan-tec.html>

Degrémont. (2016b). FANGOS Máxima valorización. Recuperado a partir de <http://www.degremon.es/es/images/pdf/folletofangos.pdf>

Bibliografía

Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental y Medio Natural. (2015, noviembre 6). PLAN ESTATAL MARCO DE GESTIÓN DE RESIDUOS (PEMAR) 2016-2022. Recuperado a partir de http://www.magrama.gob.es/imagenes/es/pemaraprobado6noviembrecondae_tcm7-401704.pdf

DLC Tratamientos de Aguas. (2016). DLC. Recuperado 3 de noviembre de 2016, a partir de <http://www.dlc.cl/>

DOBERSEK, D., GORICANEC, D., & KROPE, J. (s. f.). Dryers for Dehydration of Sludge from Sewage Treatment Plants. Recuperado a partir de <http://www.wseas.us/e-library/conferences/2012/Sliema/NACGURES/NACGURES-15.pdf>

Eco-Lagunas. (2014, enero 27). Humedales de Tratamiento de Lodos. Recuperado 1 de noviembre de 2016, a partir de <http://www.ecolagunas.com/blog/general/humedales-de-tratamiento-de-lodos.html>

Eco-Lagunas. (2016). TRATAMIENTO DE LODOS DE DEPURADORA MEDIANTE HUMEDALES ARTIFI. Recuperado 1 de noviembre de 2016, a partir de https://prezi.com/yawoa_nivp9o/tratamiento-de-lodos-de-depuradora-mediante-humedales-artifi/

EKOFINN-POL. (s. f.). MONOBELT® belt filter press - EKOFINN-POL. Recuperado 30 de agosto de 2016, a partir de http://www.ekofinn.pl/en/sludge_handling/monobelt_belt_filter_press.html

Ekotuotanto. (s. f.). Water and waste water treatment equipment, belt filter press, thickener, sludge dewatering, step screen, belt dryer, thermal sludge dryer, filter,

belt, press, filter belt press, sludge, dewatering, waste water treatment, wastewater treatment, equipment, waste water equipment, waste, water, treatment, separation, liquid, solids, washing, centrifuge, monobelt, dewatering equipment, sludge thickening,. Recuperado 30 de agosto de 2016, a partir de <http://www.ekotuotanto.fi/>

EMASA. (2016). EDAR | EMASA. Recuperado 15 de febrero de 2016, a partir de https://www.emasa.es/?page_id=414

EMASESA. (2016). Estaciones Depuradoras (E.D.A.R.) | Emasesa. Recuperado 15 de febrero de 2016, a partir de <http://www.emasesa.com/conocenos/nuestras-infraestructuras/depuracion/estaciones-depuradoras-e-d-a-r/>

EMAYA. (2013a). EDAR-PALMA1. Recuperado 15 de febrero de 2016, a partir de http://www.emaya.es/portal/page?_pageid=53,10612&_dad=portal&_schema=PORTAL

EMAYA. (2013b). EDAR-PALMA2. Recuperado 15 de febrero de 2016, a partir de http://www.emaya.es/portal/page?_pageid=53,10615&_dad=portal&_schema=PORTAL

EMO environment. (s. f.). Belt filter press - BFP. Recuperado 29 de agosto de 2016, a partir de <http://www.emo-water-sludge-treatment.com/products/sludge-dewatering/belt-filter-press-bfp/>

EMUASA. (2009). Depuradoras, EMUASA. Recuperado 15 de febrero de 2016, a partir de <http://www.emuasa.es/index.asp?Depuradoras>

Bibliografía

- Enrica Uggetti. (2011). *Sewage sludge treatment in constructed wetlands*. Universitat Politècnica de Catalunya. Recuperado a partir de http://gemma.upc.edu/images/downloads/thesis/tesis_enrica%20uggetti.pdf
- EPSAR. (2014, febrero). La aplicación de lodos en agricultura en la Comunidad Valenciana. Recuperado 23 de febrero de 2016, a partir de <http://www.ambiente.gov.ar/archivos/web/Probarros/file/58.pdf>
- Ernesto Herrera Díaz. (2016, octubre). Tornillos deshidratadores como tecnología ALTERNATIVA para la deshidratación de fangos de EDAR - Ernesto Herrera Díaz. Recuperado 9 de noviembre de 2016, a partir de <http://www.aguasresiduales.info/expertos/tribuna-opinion/tornillos-deshidratadores-como-tecnologia-alternativa-para-la-deshidratacion-de-fango-SqWwe>
- Estruaga. (2015a). Estruaga_Filtros prensa MURANO. Recuperado 14 de marzo de 2016, a partir de <http://www.estrugua.com/deshidratadores/filtros-prensa-murano-r.html?format=html&lang=es>
- Estruaga. (2015b). Estruagua_Filtros banda FB. Recuperado 14 de marzo de 2016, a partir de <http://www.estrugua.com/deshidratadores/filtros-banda-fb-r.html?format=html&lang=es>
- Eurostat. (2016). Eurostat - Electricity prices by type of user. Recuperado 2 de agosto de 2016, a partir de <http://ec.europa.eu/eurostat/tgm/refreshTableAction.do?tab=table&plugin=1&pcode=ten00117&language=en>

Filtramassa. (2015). Filtramassa_Filtro Banda. Recuperado 9 de marzo de 2016, a partir de <http://filtramas.e.telefonica.net/esp/Equipos/FiltBand/1%20FilBand.htm>

Flottweg. (2016). Flottweg_Centrífugas. Recuperado 16 de marzo de 2016, a partir de <https://www.flottweg.com/es/la-gama-de-productos/centrifugas/>

FRC Systems International. (2015). Filtro Prensa de Banda. Recuperado 29 de agosto de 2016, a partir de <http://frcsystems.com/belt-filter-press/?lang=es>

Fuentes Díaz, Manuel. (s. f.). Identificación de sistemas terciarios para el tratamiento de aguas residuales. Recuperado 20 de abril de 2016, a partir de <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Noticias/SistemasTerciarios.pdf>

GEA Group. (2016). Decantadores de deshidratación para el tratamiento de lodos. Recuperado 14 de marzo de 2016, a partir de <http://www.gea.com/es/es/products/dewatering-decanter-sludge-treatment.jsp>

Gerencia Municipal de Urbanismo del Ayuntamiento de Zaragoza. (1990, febrero 5). 05-Anexo-4-PTEC-EDAR-La-Cartuja.pdf. Recuperado 15 de febrero de 2016, a partir de <http://www.zaragoza.es/contenidos/contratos/saneamiento/PliegoPreescripcionesTecnicas/05-Anexo-4-PTEC-EDAR-La-Cartuja.pdf>

Giner, M. (2016, marzo 16). La deshidratación de fangos | TECPA Formación de Consultoría Ambiental. Recuperado a partir de <http://www.tecpa.es/la-deshidratacion-de-fangos/>

Gobierno de Aragón. (2016a). Instituto Aragonés de Estadística - Departamentos y Organismos Públicos - Gobierno de Aragón. Recuperado 22 de febrero de 2016, a partir de

Bibliografía

- <http://www.aragon.es/DepartamentosOrganismosPublicos/Institutos/ch.InstitutoAragonesEstadistica.detalleDepartamento>
- Gobierno de Aragón. (2016b). Instituto Aragonés del Agua - Departamentos y Organismos Públicos. Recuperado 10 de agosto de 2016, a partir de <http://www.aragon.es/DepartamentosOrganismosPublicos/Organismos/InstitutoAragonesAgua>
- Gonzalo Pedrero, Gema. (2014, febrero 19). Normativa aplicable a la gestión de lodos de depuración. Recuperado a partir de <http://www.ambiente.gov.ar/archivos/web/Probarros/file/MLI17.pdf>
- Hernández Lehmann, Aurelio. (2015). *Manual de diseño de estaciones depuradoras de aguas residuales* (2ª edición). Madrid: Garceta.
- Hernández Muñoz, Aurelio, Hernández Lehmann, Aurelio, & Galán Martínez, Pedro. (2004). *Manual de depuración de URALITA - Sistemas para depuración de aguas residuales en núcleos de hasta 20.000 habitantes* (2ª Edición). Madrid: Paraninfo.
- Hi-Toper. (s. f.). Triple-belt Press Thickening Dehydrating Belt Press,filter press price. Recuperado 29 de agosto de 2016, a partir de <http://www.chinafilterpress.net/belt-filter/triple-belt-press-thickening-dehydrating-belt-press.html>
- Huber Technology España. (2016a). Huber Technology España, S.L. Recuperado 8 de marzo de 2016, a partir de <http://www.huber.es/es.html>
- Huber Technology España. (2016b). Huber_SecadoSolar. Recuperado 8 de marzo de 2016, a partir de http://www.huber.es/fileadmin/huber-latinamerica/pdf/srt_es_chile.pdf
- Huber Technology España. (s. f.). Huber_Bogenpress. Recuperado 8 de marzo de 2016, a partir de

http://www.huber.es/fileadmin/01_products/04_sludge/03_entwaessern/03_bogenpresse/bs_en.pdf

INE. (2016). Instituto Nacional de Estadística. (Spanish Statistical Office). Recuperado 22 de febrero de 2016, a partir de <http://www.ine.es/welcome.shtml>

InfoEnviro. (2012, febrero). EDAR_Punta_Umbria.pdf. Recuperado a partir de http://www.cadagua.es/pdf/edar_punta_umbria.pdf

INGOR. (2016). Filtro prensa - INGOR. Recuperado 15 de marzo de 2016, a partir de <http://www.ingor.net/DMA%20filtroprensa.htm>

Instituto Nacional de Estadística. (2016). Población por capitales de provincia y sexo (Tabla2911). Recuperado 15 de febrero de 2016, a partir de <http://www.ine.es/jaxiT3/Tabla.htm?t=2911&L=0>

Jairo Alberto Romero Rojas. (1999). *Potabilización del agua* (3ª Edición). México D.F.: Alfaomega Grupo Editor S.A.

Juan Manuel de Andrés Almeida. (2010). *Gasificación de lodos de estaciones depuradoras de aguas residuales urbanas (EDAR)*. Universidad Politécnica de Madrid, Madrid. Recuperado a partir de http://oa.upm.es/3388/1/JUAN_MANUEL_DE_ANDRES_ALMEIDA.pdf

Juan Palacios Izaguirre. (2011). EDAR La Cartuja (Zaragoza). Recuperado 15 de febrero de 2016, a partir de http://catedramln.unizar.es/files/cursos/2010-2011/estaciones_tratamiento_aguas/Palacios.pdf

Mad Digital. (2016). Andreu Bonet _ Centrifugas. Recuperado 14 de marzo de 2016, a partir de <http://andreuboet.com/es/equipos-de-alquiler>

Bibliografía

MadeInChina. (s. f.). Shandong Innovation Huayi Environmental Engineering New Design Membrane Filter Press. Recuperado 4 de septiembre de 2016, a partir de <http://chuangxinhuayi.en.made-in-china.com/product/dSCmzsyjQErO/China-2016-New-Design-Membrane-Filter-Press.html>

Ministerio de Agricultura y Medio Ambiente. (2015). Anuario de Estadística 2014. Recuperado 8 de agosto de 2016, a partir de http://www.magrama.gob.es/estadistica/pags/anuario/2014/AE_2014_Completo.pdf

Ministerio de Agricultura y Medio Ambiente. (2016a). Inventario de instalaciones - Inventario Completo| PRTR España. Recuperado 27 de julio de 2016, a partir de <http://www.prtr-es.es/Informes/InventarioInstalacionesIPPC.aspx>

Ministerio de Agricultura y Medio Ambiente. (2016b). PRTR España | Registro Estatal de Emisiones y Fuentes Contaminantes (PRTR-España). Recuperado 27 de julio de 2016, a partir de <http://www.prtr-es.es/>

Ministerio de Fomento, Ministerio de Agricultura y Medio Ambiente, & Centro de Estudio y Experimentación de Obras Públicas. (2013, diciembre). Lodos de depuradora. Recuperado a partir de <http://www.ambiente.gov.ar/archivos/web/Probarros/file/233.pdf>

Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. (2016). Lodos de depuración de aguas residuales. Recuperado 4 de agosto de 2016, a partir de <http://www.magrama.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/prevencion-y-gestion-residuos/flujos/lodos-depuradora/>

Murcia Navarro, Francisco José. (2013). *Lodos de depuradora: una visión integral para su posible aplicación a suelos desde una perspectiva agrícola*. (Tesis doctoral).

- Universidad de Murcia, Murcia. Recuperado a partir de <http://www.ambiente.gov.ar/archivos/web/Probarros/file/226.pdf>
- Nassar, A. M., Smith, M., & Afifi, S. (2006). Sludge dewatering using the reed bed system in the Gaza Strip, Palestine. *Water and Environment Journal*, 20(1), 27-34. <https://doi.org/10.1111/j.1747-6593.2005.00019.x>
- Oficina de Publicaciones de la Unión Europea. (2016a, agosto). Portal de datos abiertos de la Unión Europea. Recuperado 7 de agosto de 2016, a partir de https://data.europa.eu/euodp/es/data/group/eurovoc_domain_100155?_eurovoc_domains_limit=0&_tags_limit=0
- Oficina de Publicaciones de la Unión Europea. (2016b, agosto 7). EUROPA - European Union website, the official EU website [Text]. Recuperado 7 de agosto de 2016, a partir de https://europa.eu/european-union/index_es
- Ojeda Castro, Franklin Gerardo. (2015, mayo). *Aplicaciones en superficie de lodos de depuradora y sus repercusiones sobre la erosión y las propiedades físicas del suelo*. Universitat Autònoma de Barcelona. Recuperado a partir de <http://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/3670/fgoc1de1.pdf?sequence=1>
- Pablo Herrero. (2012, enero 24). Cálculo de amortizaciones de maquinas desde cero. Recuperado a partir de <http://blog.sage.es/contabilidad-fiscalidad-laboral/calculo-de-amortizaciones-desde-cero/>
- PromedioBadajoz. (2016). *Pedro Tomás Martín - Depuración de aguas residuales de bajo coste*. Recuperado a partir de <https://www.youtube.com/watch?v=TzbqgNHIUO0&feature=youtu.be>

Bibliografía

- Sedaqua. (2016). Sedaqua - Humedales para tratamientos de lodos. Recuperado 1 de noviembre de 2016, a partir de <http://sedaqua.com/servicios/lodos>
- SeproAgua. (2016). Tornillo de presión SP-SF - SerproAgua. Recuperado 9 de noviembre de 2016, a partir de <https://www.serproagua.com/tornillo-presion-sp-sf/>
- Shandong Xinhai Mining Technology & Equipment Inc. (2014). Xinhai_Filtro Prensa. Recuperado 17 de marzo de 2016, a partir de <http://www.geedkanolsha.com/filtro-prensa>
- Suez Environnement. (2016a). Heliantis. Recuperado 8 de noviembre de 2016, a partir de https://www.suezwaterhandbook.com/content/download/5443/88563/version/5/file/Heliantis_P-B-015-EN-1604_v2.pdf
- Suez Environnement. (2016b). Heliantis™ Solar Sludge Drying. Recuperado 28 de junio de 2016, a partir de <http://www.degremont-technologies.com/Heliantis-TM-Solar-Sludge-Drying>
- TECPA. (2016, enero 21). Humedales artificiales en depuración de aguas residuales | TECPA Formación de Consultoría Ambiental. Recuperado a partir de <http://www.tecpa.es/humedales-artificiales-en-depuracion-de-agua-residual/>
- Toro Equipment. (2015). Toro_FiltroPrensa. Recuperado 16 de marzo de 2016, a partir de <http://toroequipment.com/wp/wp-content/uploads/2015/10/Cat%C3%A1logo-Filtro-Prensa-DRACO.pdf>
- Troesch, S., Liénard, A., Molle, P., Merlin, G., & Esser, D. (2009). Sludge drying reed beds: full- and pilot-scale study for activated sludge treatment. *Water Science & Technology*, 60(5), 1145. <https://doi.org/10.2166/wst.2009.388>

- Uggetti, E., Ferrer, I., Llorens, E., & García, J. (2010). Sludge treatment wetlands: A review on the state of the art. *Bioresource Technology*, *101*(9), 2905-2912. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.11.102>
- Uggetti, E., Llorens, E., Pedescoll, A., Ferrer, I., Castellnou, R., & García, J. (2009). Sludge dewatering and stabilization in drying reed beds: Characterization of three full-scale systems in Catalonia, Spain. *Bioresource Technology*, *100*(17), 3882-3890. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.03.047>
- Veolia Water Technologies. (2016). SOLIA Mix. Recuperado 9 de noviembre de 2016, a partir de http://www.veoliawatertechnologies.es/vwst-iberica/ressources/files/1/47965-160201_VWT_SPAIN_Brochure_SOLIAMix.pdf
- veolia-water-technologies-. (2016, junio 20). Solia™ Mix, el secado solar de lodos de última generación de Veolia Water Technologies - Noticias [Text]. Recuperado 1 de julio de 2016, a partir de <http://www.iagua.es/noticias/espana/veolia-water-technologies/16/06/17/soliatm-mix-secado-solar-lodos-ultima-generacion>

Relación de documentos

<input checked="" type="checkbox"/> Memoria	119	páginas
<input type="checkbox"/> Anexo I Encuesta del Conjunto de Estudio 1	4	páginas
<input type="checkbox"/> Anexo II Encuesta del Conjunto de Estudio 2	1	página
<input type="checkbox"/> Anexo III Fichas técnicas de los equipos	14	páginas
<input type="checkbox"/> Anexo IV Costes de explotación	19	páginas
<input type="checkbox"/> Anexo V Amortización	22	páginas

La Almunia, a 29 de 11 de 2016

Firmado: Víctor Rivera Tena

