



POLITÉCNICA



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA
AGRONÓMICA, ALIMENTARIA Y DE BIOSISTEMAS

MÁSTER EN TECNOLOGÍA AGROAMBIENTAL
PARA UNA AGRICULTURA SOSTENIBLE.
(T.A.P.A.S)

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA Y TECNOLOGÍA DE
LOS ALIMENTOS.

PRODUCCIÓN, TRATAMIENTOS, CARACTERIZACIÓN Y
DESTINO FINAL DE LOS LODOS DE ESTACIONES
DEPURADORAS DE AGUAS RESIDUALES (EDAR)
GENERADOS EN LA COMUNIDAD DE MADRID.

TRABAJO FIN DE MÁSTER.

Autor/a: Álvaro Thovar Puebla.

Tutor/a: AUGUSTO ARCE.

FEBRERO de 2023.

ÍNDICE DE CONTENIDO.

1. INTRODUCCIÓN.....	5
1.1. La importancia del saneamiento de las aguas residuales a lo largo de la historia	5
1.2. Las EDAR. Estación de Depuración de Aguas Residuales. Lodos de depuración.	6
1.3. Problemática actual.	8
1.4. Producción de lodos de las EDARs en España.	8
1.4.1. Características principales de los lodos.....	10
1.4.2. Definiciones.	11
2. OBJETIVOS.	14
3. MARCO NORMATIVO. Aplicación de lodos de depuradora. CAM.....	15
4. TRATAMIENTOS, COMPOSICIÓN Y DESTINO DE LOS LODOS.	19
4.1. Tratamientos de las aguas residuales y los lodos de una EDAR.....	20
4.2. Obtención de fangos y tratamientos.	28
4.3. Composición de los lodos de una EDAR.	36
4.4. Caracterización y aceptación de los suelos a esos lodos.	39
4.5. Cantidad máxima de lodos / ha que se puede aplicar al suelo.	41
4.6. Destino final de los lodos de depuración de una EDAR.	43
4.6.1. Aspectos logísticos previos al reparto en el suelo agrícola.	44
5. GENERACIÓN DE LODOS EN LA CAM.	45
5.1. Generación y gestión actual de lodos en la CAM.	50
5.2. Tratamientos de lodos de las EDARs del Canal de Isabel II en la Comunidad Autónoma de Madrid.....	52
6. VALORACIÓN DE LOS POSIBLES EFECTOS AMBIENTALES DE LA APLICACIÓN DE LODOS EN LA AGRICULTURA.	61
6.1. Efectos sobre las propiedades físicas del suelo	61
6.2. Efectos sobre las propiedades químicas del suelo.....	62
6.3. Efectos sobre las propiedades microbiológicas del suelo.	65
6.4. Riesgos ambientales de la utilización de lodos de depuradora en suelos.....	66

7. DISPOSICIÓN FINAL. POSIBLES ALTERNATIVAS	69
8. CONCLUSIONES.	72
9. BIBLIOGRAFÍA.	73

ÍNDICE DE FIGURAS.

Figura 1: Letrinas comunes romanas (siglo IV).	5
Figura 2: Estación Depuradora de Aguas Residuales (EDAR)	7
Figura 3: Evolución del volumen de lodos generados en todo el territorio Nacional.	9
Figura 4: Volumen de lodos generados a nivel autonómico en España en 2020. Fuente: INE	9
Figura 5: Volumen de lodos generados a nivel autonómico en la CAM en 2020. Fuente: INE.	10
Figura 6: Gestión de lodos de depuradora. Legislación aplicable.	18
Figura 7: Jerarquía en la aplicación de residuos. Lodos de depuradora.	19
Figura 8: Esquema general del tratamiento de lodos de depuración de una EDAR.....	21
Figura 9: Pozo de gruesos.....	22
Figura 10: Fase de pretratamiento de aguas residuales. Desbaste y tamizado	22
Figura 11: Pretratamiento de aguas residuales. Canal y carro desarenador en funcionamiento.	23
Figura 12: Decantador primario vacío.....	25
Figura 13: Decantadores secundarios en funcionamiento.	26
Figura 14: Reactor de fangos activos funcionando y sin funcionar.	26
Figura 15: Decantación secundaria.	27
Figura 16: Digestor Anaerobio.	30
Figura 17: Reacciones químicas desarrolladas durante el proceso de digestión anaerobia.	31
Figura 18: Deshidratación del fango por centrifugación.	34
Figura 19: Espesador centrífugo de fangos.	34
Figura 20: Depósito de fangos deshidratados.....	35

Figura 21: Esquema general del proceso de obtención de biogás, energía eléctrica y fango deshidratado.....	36
Figura 22: Destino final de los lodos en España. Fuente: Registro Nacional de Lodos.	43
Figura 23: Destino final a nivel Autonómico de lodos EDAR en España. Fuente: Instituto Nacional de Estadística (INE)	44
Figura 24:EDAR gestionadas por el Canal de Isabel II en la CAM.....	52
Figura 25: Planta de compostaje y secado térmico con cogeneración eléctrica de Loeches.	53
Figura 26: Mezcla homogénea de lodos deshidratados con restos de poda.	54
Figura 27: Camión bañera para transporte de lodos deshidratados.	55
Figura 28: Cinta transportadora y tolvas de almacenaje. EDAR sur.....	56
Figura 29: Secador mixto. trómel de secado de lodos y caldera de intercambiador de calor.	57

ÍNDICE DE TABLAS.

Tabla 1: Composición general de lodos tratados en una EDAR.	37
Tabla 2: Lodos utilizados en agricultura en España. Valor medio de concentración (mg/kg de materia seca)	38
Tabla 3: Valores límite de concentración de metales pesados en los suelos según el RD 1310/1990.	40
Tabla 4: valores límite de concentración de metales pesados en los suelos según el RD 1051/2022 para la nutrición sostenible en los suelos agrarios.....	40
Tabla 5: Valores límite establecidos por RD 1310/1990 para la aplicación de lodos EDAR en agricultura.	41
Tabla 6: Valores límite establecidos por RD 1051/2022 para la aplicación de lodos EDAR en agricultura.	41
Tabla 7: Cantidades máximas de lodos que podrán aportarse al suelo por ha y año (RD 1310/1990).....	42
Tabla 8 : Cantidades máximas de lodos que podrán aportarse al suelo por hectárea y año según RD 1051/2022.	42
Tabla 9: Producción de lodos en EDARs de titularidad del Canal de Isabel II en el período 2006-2015.	46
Tabla 10: Población servida por las EDARs de titularidad del Canal de Isabel II en el período 2006-2015.....	47
Tabla 11: Producción de lodos en EDARs de titularidad del Ayuntamiento de Madrid en el período 2006- 2015.....	48
Tabla 12: Población equivalente servida por las EDARs de titularidad del Ayuntamiento de Madrid en el 2006-2015.....	49
Tabla 13: Generación y destino final de lodos (Canal de Isabel II y Ayuntamiento de Madrid) en el periodo 2006-2015.....	50
Tabla 14: Plantas de secado térmico y cogeneración de antigua titularidad del Ayuntamiento de Madrid y ahora gestionadas por el Canal de Isabel II.....	59
Tabla 15: Destino final de los lodos generados por las EDARs de titularidad del Ayuntamiento de Madrid y ahora gestionados por Canal.	60

1. INTRODUCCIÓN.

El presente Trabajo Fin de Máster, titulado “Producción, tratamientos, caracterización y destino final de los lodos de estaciones depuradoras de aguas residuales generados en la Comunidad de Madrid” se ha realizado teniendo en cuenta los siguientes antecedentes:

1. La importancia del saneamiento de las aguas residuales a lo largo de la historia.
2. Las EDAR. Estación de Depuración de Aguas Residuales. Lodos de depuración.
3. Problemática actual.
4. Producción de lodos de las EDARs en España y características de estos.

1.1. La importancia del saneamiento de las aguas residuales a lo largo de la historia

La preocupación por la calidad del agua y la evacuación de vertidos está presente en todas las civilizaciones a lo largo de la historia.

Se han encontrado en ruinas de algunas ciudades antiguas de Creta y Asiria, restos de alcantarillado, así como cloacas en distintas ciudades del imperio romano.

A finales de la Edad Media, en Europa el agua fecal se depositaba en excavaciones subterráneas y, más adelante, se construyeron letrinas. Ya entonces, parte del contenido de estos pozos negros se utilizaba como fertilizante o era vertido en cauces cercanos.

Más adelante se recuperaría la costumbre romana de construir desagües, en forma de canales de aire o zanjias en la calle. Por todo esto, se ocasionaron graves problemas de salud pública ya que el agua contaminada entraba en contacto con una mayor parte de la población.



Figura 1: Letrinas comunes romanas (siglo IV).

A comienzos del siglo XIX, debido a las reiteradas epidemias de cólera y otras enfermedades, se empieza a generalizar en las grandes ciudades la recogida del agua residual y, ya en su segunda mitad, se populariza el establecimiento de sistemas de abastecimiento municipal de agua y la instalación de cañerías en las casas. Con la llegada de los primeros sistemas sanitarios modernos se comienzan a construir alcantarillados en las grandes ciudades. (*Aguas residuales a lo largo de la historia*, pp. 3-5)

Sin embargo, la construcción de las primeras redes de alcantarillado, aunque contribuían a reducir el número de puntos de vertido mejorando algunas condiciones locales respecto a la situación anterior, se empezó a producir una mayor concentración de la contaminación y un agravamiento del estado de los ríos, produciéndose condiciones higiénicas y ambientales inaceptables. Es entonces cuando surge la idea de que el vertido de aguas residuales debería utilizarse para fertilizar el suelo.

A partir de este punto se comienzan a desarrollar unos incipientes sistemas de depuración, dirigidos en un principio a la eliminación de materias sólidas y, posteriormente, la de la materia orgánica soluble mediante los tratamientos biológicos.

No es hasta principios del siglo XX, cuando, por fin, se reconoce que la eliminación de los desperdicios a través de los ríos causaba problemas en la salud pública. Durante esta época se introdujo el concepto de fosa séptica como unidad de tratamiento primario de las aguas negras domésticas para procesar aguas residuales, tanto en áreas suburbanas como rurales.

Los avances realmente relevantes llegan a mitad del siglo XX y hasta la década de los 70 del siglo pasado no se comienza a depurar el agua residual de una forma regular, aunque a finales de los años 60 ya se había desarrollado una base científica de los tratamientos biológicos convencionales.

1.2. Las EDAR. Estación de Depuración de Aguas Residuales. Lodos de depuración.

Una Estación Depuradora de Aguas Residuales (EDAR) puede definirse como el conjunto de instalaciones que tiene por objeto la reducción de la contaminación de las aguas residuales hasta límites aceptables para el cauce receptor.

Además de esto, debe tratar los fangos producidos en los procesos de depuración del agua residual, a fin de conseguir un producto que cumpla con las condiciones exigidas por la legislación en materia de estos residuos.

Los lodos de depuración son una mezcla de agua y sólidos separada del agua residual, como resultado de procesos naturales o artificiales.

Estos lodos se generan en las estaciones depuradoras que reciben las aguas residuales urbanas, en las fosas sépticas y en otras estaciones depuradoras de aguas residuales industriales que tratan aguas de composición similar (principalmente de la industria agroalimentaria).

Los lodos de depuración se forman debido a las distintas etapas del tratamiento de las aguas residuales. Las aguas residuales urbanas pasan por una vía de tratamiento para que se limpien y se puedan utilizar. Una vez que las aguas han pasado por la depuradora se vierten y la carga eliminada se queda concentrada como una fase sólida, conocida como los lodos de depuración.

Con carácter general los lodos se tratan en la propia depuradora para reducir su contenido en agua, patógenos y asegurar la estabilidad de la materia orgánica. Existen algunos tratamientos biológicos comunes para tratar estos lodos, que se comentarán más adelante.

La práctica más usada para su destino final, es el empleo de los lodos en agricultura. El marco legal que regula la aplicación de los lodos de depuradoras a los suelos agrícolas marca una serie de valores límite de metales pesados que no deben sobrepasarse y obliga a tratar los mismos. Una vez tratados, los lodos pueden ser sometidos a otras operaciones finalistas que aseguren un destino final adecuado y ambientalmente seguro.

Por otro lado, se deben conocer las necesidades nutritivas de las plantas para fijar las dosis de aplicación, de este modo, se evita que sean afectadas por efectos nocivos procedentes tanto de la calidad de los lodos como por las características del suelo.



Figura 2: Estación Depuradora de Aguas Residuales (EDAR)

1.3. Problemática actual.

Se ha decidido abordar el siguiente trabajo principalmente por los siguientes problemas derivados del tratamiento, control y aplicación de las aguas residuales y de los lodos:

1. Debido al crecimiento de la población, el aumento de la demanda de agua tiene como consecuencia el aumento de los residuos que genera.
2. La superficie agrícola disponible para recibir los lodos está alcanzando su máximo.
3. Existen períodos en los que no se puede realizar la aplicación de los lodos por causas climatológicas (precipitaciones y temperaturas inadecuadas) o por condicionantes agrícolas.
4. La incorrecta aplicación de lodos en agricultura puede ocasionar problemas por malos olores y riesgo de contaminación de las masas de agua subterránea o del suelo.

Esta problemática puede minimizarse con el adecuado funcionamiento, seguimiento y control de las instalaciones de secado de lodos, la implantación de almacenamientos temporales y buenas prácticas agrarias en su aplicación.

1.4. Producción de lodos de las EDARs en España.

Según el Instituto Nacional de Estadística (INE), el volumen de lodos generados en el tratamiento de aguas residuales en todo el territorio Nacional durante el año 2020 ascendió a 1.148.222 toneladas de materia seca.

Según los datos del Registro Nacional de Lodos, en España se producen anualmente alrededor de 1.200.000 t de m.s./año.

En la figura 3 se muestra un gráfico en el que podemos observar la evolución del volumen de lodos generados en España. Estas cifras facilitadas por el Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente permiten contemplar el crecimiento constante en la producción de lodos en los últimos 20 años.

Producción de lodos en España en los últimos años.
Fuente: Ministerio de Medio Ambiente y CCAA * Datos previstos por la UE



Figura 3: Evolución del volumen de lodos generados en todo el territorio Nacional.

En la figura 4 se muestra el volumen expresado en toneladas de materia seca y año de lodos generados a nivel autonómico en todo el territorio nacional. Se puede observar que Cataluña es la comunidad que más lodos genera, seguida de Andalucía, Valencia y Madrid. (*Destino final de lodos en España (INE)*)

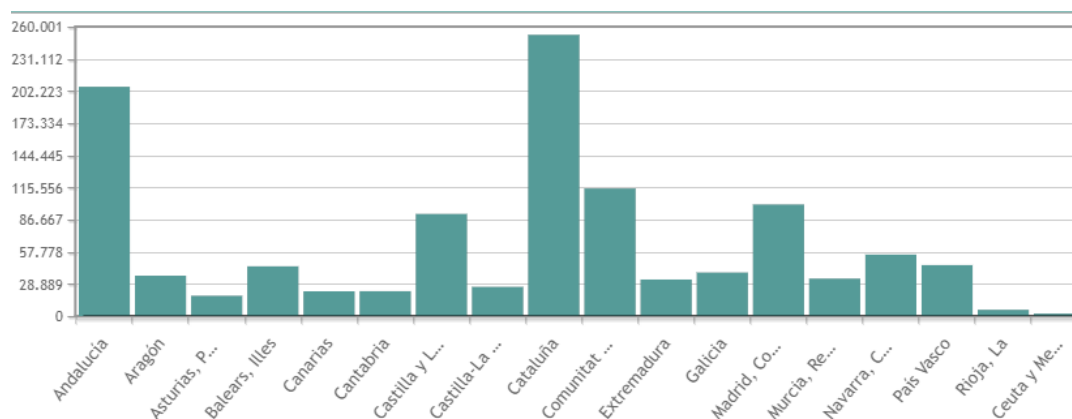


Figura 4: Volumen de lodos generados a nivel autonómico en España en 2020. Fuente: INE

Por otro lado, en la figura 4 observamos que la CCAA de Madrid ha generado (100.111 toneladas de materia seca/ año) en el año 2020 y es la cuarta Comunidad Autónoma que más lodos de depuración genera en todo el territorio Nacional.

También podemos visualizar en el siguiente mapa los distintos niveles de producción de lodos por Comunidad Autónoma en toneladas de materia seca y año.



Figura 5: Volumen de lodos generados a nivel autonómico en la CAM en 2020. Fuente: INE.

1.4.1. Características principales de los lodos.

Los lodos se caracterizan por ser un residuo extremadamente líquido (más de un 95% de agua). Su composición es variable y depende de la carga de contaminación del agua residual inicial y de las características técnicas de los tratamientos llevados a cabo en las aguas residuales.

Los tratamientos del agua concentran la contaminación presente en el agua, y, por tanto, los lodos contienen una amplia diversidad de materias suspendidas o disueltas. Algunas de ellas con alto valor agronómico como:

- Materia Orgánica.
- Nitrógeno (N)
- Fósforo (P)
- Potasio (K)

y en menor cantidad:

- Calcio (Ca)
- Magnesio (Mg)
- Otros micronutrientes esenciales para las plantas.

Existen otras con potencial contaminante como los metales pesados, entre ellos:

- cadmio (Cd)

- cromo (Cr)
- cobre (Cu)
- mercurio (Hg)
- níquel (Ni)
- plomo (Pb)
- zinc (Zn)

También pueden estar presentes otros contaminantes como:

- patógenos
- contaminantes orgánicos.

El lodo según como se trate puede ser un residuo o un recurso. El problema del lodo es que puede contener una serie de compuestos tóxicos según su concentración, por lo que se debe tener especial precaución cuando se aplica en agricultura, pudiendo reducir así un posible riesgo tanto de contaminación ambiental como de intoxicación alimentaria, con los consiguientes problemas para la salud.

En conclusión, es un producto que con los adecuados tratamientos y controles puede resultar beneficioso y mejorar algunos parámetros agronómicos, como la materia orgánica, la relación C/N, o la CIC mejorando la fertilidad del suelo, pero también puede provocar que se produzca contaminación ambiental como consecuencia de la presencia de contaminantes emergentes que se quedan en el suelo, lixiviando y afectando así al ciclo del agua.

1.4.2. Definiciones.

A los efectos de este trabajo, se entenderá por:

- **Lodos tratados:** Son lodos que proceden de estaciones depuradoras de aguas residuales domésticas o urbanas o de aguas residuales de composición similar a las urbanas, tratados por vía biológica, química o térmica de manera que se reduzca de forma significativa su poder de fermentación y con ello los inconvenientes de su utilización. Un lodo tratado se encuentra ya estabilizado tras ser sometido a un proceso biológico anaeróbico en el digestor y contiene en torno a un 95 % de humedad. Es un lodo ya apto para su disposición final o procesado para otros tratamientos.
- **Lodos deshidratados:** Son los lodos tratados sometidos, en la propia Estación Depuradora de Aguas Residuales (EDAR), a un proceso de pérdida de agua por procedimientos físico, químicos o térmicos, previo a su utilización. El contenido de humedad no debe superar el 80% y suele estar en torno al 70-75 %

- **Lodos secados:** Son los lodos tratados con un contenido de humedad inferior al 70 %. Aquellos que han sido tratados en una planta de secado térmico, pueden alcanzar un contenido de humedad igual o inferior al 10% (en torno al 5%)
- **Lodos compostados:** Son lodos tratados sometidos a un proceso de transformación biológica aerobia, con la finalidad de obtener un producto estable y no fitotóxico. El compostaje puede llevarse a cabo con la adición de otros productos, con objeto de equilibrar la relación C/N del lodo, reducir su contenido en humedad y mejorar su estructura.
- **Recirculación:** Una parte de los lodos del decantador secundario se devuelven al reactor biológico para asegurar la actividad biodegradativa de los microorganismos.
- **Compostaje:** Transformación biológica de la materia orgánica en compost en presencia de oxígeno y condiciones de humedad, pH y temperatura controladas.
- **Incineración:** Oxidación total de los residuos en exceso de aire y a temperaturas superiores a 850 °C según la normativa europea. Se realiza en hornos apropiados con aprovechamiento (valorización energética) o no.
- **Valorización energética de residuos:** Operación de gestión de los residuos por la cual el residuo sirve como combustible para la producción de energía, bien por:
 - procesos biológicos (biometanización o aprovechamiento del gas procedente de la fermentación anaerobia de los residuos de vertedero)
 - Bien por procesos térmicos (pirólisis, gasificación, combustión, incineración o tratamiento por plasma).
- **Aguas residuales urbanas:** Las aguas residuales domésticas o la mezcla de las mismas con aguas residuales industriales y/o agua de escorrentía pluvial.
- **Aguas residuales domésticas:** Las aguas residuales procedentes de zonas de vivienda y de servicios, generadas principalmente por el metabolismo humano y las actividades domésticas.

- Aguas residuales industriales: Todas las aguas residuales vertidas desde locales utilizados para efectuar cualquier actividad comercial o industrial, que no sean aguas residuales domésticas ni aguas de escorrentía pluvial.
- Peso expresado en materia húmeda (t/mh): Peso del lodo a la salida de la línea de tratamiento de fangos, cuyo contenido en humedad es del orden del 75-80%.
- Peso expresado en materia seca (t/ms): Peso referido al contenido en materia seca del lodo, una vez eliminada toda la humedad del mismo.

2. OBJETIVOS.

Debido a la elevada población de la Comunidad de Madrid, el alto porcentaje de depuración de sus aguas residuales, y por lo tanto la gran producción de lodos, se genera una importante problemática. A tal efecto, en este trabajo se persiguen los siguientes objetivos:

1. Conocer la producción total de lodos de las estaciones depuradoras de las aguas residuales (EDAR) en la Comunidad Autónoma de Madrid.
2. Estudiar los diferentes tratamientos y composición de los lodos (metales pesados, contaminantes emergentes...)
3. Determinar el destino final de los lodos EDAR de la CAM y discutir la documentación para su destino final en la agricultura.
4. Valorar los posibles efectos medioambientales de la aplicación de estos lodos en la agricultura.

3. MARCO NORMATIVO. Aplicación de lodos de depuradora. CAM

La eliminación de residuos procedentes, en este caso, de la depuración de aguas residuales de la Comunidad Autónoma de Madrid (lodos), constituyen un problema y, a fin de reducirlos, reciclarlos, y reutilizarlos de una forma respetuosa con el medio ambiente, se establece una regulación específica en materia de gestión de lodos de depuradora que se desarrolla según la siguiente legislación:

- Normativa en materia de residuos:
 - Ley 10/1998, de 21 de abril, de Residuos. (BOE n.º 96, 22-04-98)
 - Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 19 de noviembre de 2008, sobre residuos (Directiva Marco de Residuos ó DMR)
 - Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados (LRSC)
 - Ley 7/2022, de 8 de abril, de residuos y suelos contaminados para una economía circular.

- Normativa según su utilización en agricultura:
 - Directiva del Consejo, de 12 de junio de 1986, relativa a la protección del medio ambiente y, en particular, de los suelos, en utilización de los lodos de depuradora en agricultura (86/278/CEE)
 - Real Decreto 1310/1990, de 29 de octubre, por el que se regula la utilización de los lodos de depuradora en el sector agrario.
 - Orden AAA/1072/2013, de 7 de junio, sobre utilización de los lodos de depuración en el sector agrario.
 - Real Decreto 1051/2022, de 27 de diciembre, por el que se establecen normas para la nutrición sostenible en los suelos agrarios.

- Nitratos:
 - Directiva 91/676/CEE del Consejo, de 12 de diciembre de 1991, relativa a la protección de las aguas contra la contaminación producida por nitratos procedentes de fuentes agrarias.
 - Real Decreto 261/1996, de 16 de febrero, sobre protección de las aguas contra la contaminación producida por los nitratos procedentes de fuentes agrarias.
 - Real Decreto 47/2022, de 18 de enero, sobre protección de las aguas contra la contaminación difusa producida por los nitratos procedentes de fuentes agrarias.

- Fabricación de productos fertilizantes:
 - Reglamento (CE) N° 2003/2003 del Parlamento Europeo y del Consejo de 13 de octubre de 2003 relativo a los abonos.
 - Real Decreto 506/2013, de 28 de junio, sobre productos fertilizantes.
 - Orden AAA/2564/2015, de 27 de noviembre, por la que se modifican los anexos I, II, III, IV y VI del Real Decreto 506/2013, de 28 de junio sobre productos fertilizantes.
 - Real Decreto 999/2017, de 24 de noviembre, por el que se modifica el Real Decreto 506/2013, de 28 de junio, sobre productos fertilizantes.
 - Reglamento (UE) 2019/1009 del Parlamento Europeo y del Consejo de 5 de junio de 2019, por el que se establecen disposiciones relativas a la puesta a disposición en el mercado de los productos fertilizantes de la UE y se modifican los Reglamentos anteriores y se deroga el Reglamento (CE) n° 2003/2003
 - Orden APA/161/2020, de 20 de febrero, por la que se modifican los anexos I, III y VI del Real Decreto 506/2013, de 28 de junio, sobre productos fertilizantes.

- Fabricación de productos fitosanitarios.
 - Real Decreto 2163/1994, de 4 de noviembre por el que se implanta el sistema armonizado comunitario de autorización para comercializar y utilizar productos fitosanitarios.
 - Real Decreto 1311/2012, de 14 de septiembre, por el que se establece el marco de actuación para conseguir un uso sostenible de los productos fitosanitarios.
 - Real Decreto 971/2014 de 21 de noviembre, por el que se regula el procedimiento de evaluación de productos fitosanitarios.

- Normativa en Incineración/coincineración.
 - Directiva 2010/75/UE, del Parlamento Europeo y del Consejo, de 24 de noviembre de 2010, sobre emisiones industriales (prevención y control integrados de la contaminación)
 - 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.

- Normativa para su eliminación en vertedero.
 - Directiva 1999/31/CEE del Consejo, de 26 de abril de 1999, relativa al vertido de residuos.

- Real Decreto 1418/2001, de 27 de diciembre, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero.
 - 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.
- Normativa en el tratamiento de aguas residuales y contaminación.
- Real Decreto 509/1996, de 15 de marzo, de desarrollo del Real Decreto-ley 11/1995, de 28 de diciembre, por el que se establecen las normas aplicables al tratamiento de las aguas residuales urbanas.
 - Directiva 96/61/CE del Consejo del 24 de septiembre de 1996 relativa al enfoque integrado de la prevención y el control de la contaminación.
- Normativa adicional aplicable en la Comunidad Autónoma de Madrid.
- Ley 10/1993, de 26 de octubre, sobre vertidos líquidos industriales al sistema integral de saneamiento, de la Comunidad de Madrid, que regula los vertidos líquidos industriales al sistema integral de saneamiento, por lo que condiciona la composición de los lodos de depuración de las aguas residuales del mismo.
 - Decreto 193/1998, de 20 de noviembre, por el que se regula en la Comunidad de Madrid, la utilización de lodos de depuradora en la agricultura.
 - Decreto 57/2005, de 30 de junio, por el que se revisan los Anexos de la Ley 10/1993, de 26 de octubre, sobre vertidos líquidos industriales al sistema integral de saneamiento
 - Orden 2305/2014, de 3 de noviembre, de la Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio, por la que se modifican los Anexos del Decreto 193/1998, de 20 de noviembre, por el que se regula, en la Comunidad de Madrid, la utilización de lodos de depuradora en agricultura)

Fuente: (311_443_plan_regional_lodos_depuradora_0.pdf, pp. 7-9)
 («Gestión de lodos de depuradora - Conoce toda su normativa», 2019)

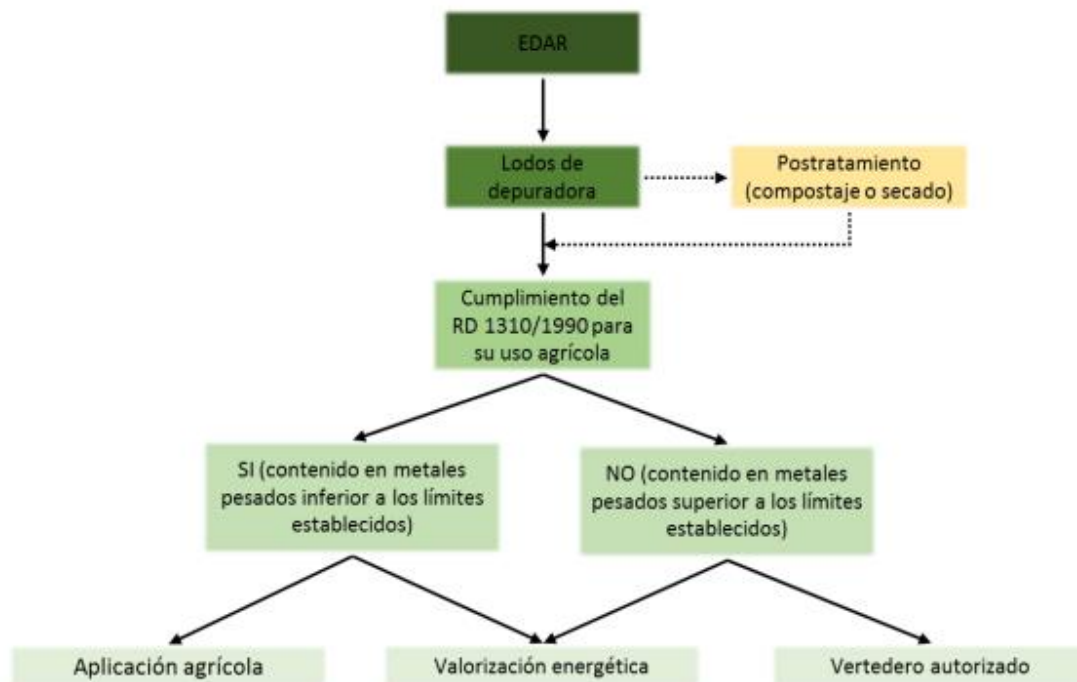


Figura 6: Gestión de lodos de depuradora. Legislación aplicable.

Para la utilización de lodos E.D.A.R. en agricultura se debe cumplir con la normativa correspondiente para su utilización en el sector agrario.

En la figura 6, se muestra un esquema de la gestión de los lodos de una E.D.A.R. Tras el postratamiento y presentación del lodo, habiéndose reducido de forma significativa su poder de fermentación y los inconvenientes sanitarios de su utilización, siempre que cumplan con la normativa, podrán destinarse bien a aplicación agrícola, o a valorización energética. Si por el contrario no cumplen con la normativa, se destinarán a valoración energética o a vertedero autorizado.

4. TRATAMIENTOS, COMPOSICIÓN Y DESTINO DE LOS LODOS.

Los lodos se tratan en la propia depuradora para reducir su contenido en agua, en patógenos y asegurar la estabilidad de la materia orgánica.

Los tratamientos biológicos más frecuentes son:

- La digestión anaerobia.
- La estabilización aerobia.
- El compostaje.

Los lodos se deben gestionar correctamente siguiendo la legislación y respetando la jerarquía de residuos que se muestra en la figura 7.



Figura 7: Jerarquía en la aplicación de residuos. Lodos de depuradora.

La generación de residuos no siempre se puede evitar y es necesario darle un tratamiento adecuado. Por ello, se establece el orden en la jerarquía de opciones de gestión: reducción, reutilización, reciclado y otras formas de valorización, por ese orden. Sólo cuando no sea posible la gestión de los residuos a través de los sistemas anteriormente citados, se procederá a su eliminación.

El objetivo es, como indica el Plan Nacional de Lodos de Depuradora de Aguas Residuales, prevenir en la medida de lo posible, reutilizar lo que se pueda, reciclar lo que no se pueda reutilizar y valorar energéticamente todo lo que no se pueda reutilizar o reciclar. El depósito final en vertedero es la última opción, la menos satisfactoria. Este

principio de orden general puede ser matizado en razón de los condicionantes tecnológicos y económicos que se den en cada caso.

Una vez se han tratado los lodos, hay varios destinos posibles, dependiendo de la composición final que tengan:

- I. Pueden aplicarse en suelos agrícolas según lo establecido en el Real Decreto 1310/1990, de 29 de octubre.
- II. Pueden ser incinerados para valoración energética de acuerdo con el Real Decreto 653/2003, de 30 de mayo.
- III. Otra opción es su deposición en vertedero según el Real Decreto 1481/2001, de 27 de diciembre.

En algunos casos, estos lodos son tratados fuera de las depuradoras en instalaciones específicas de tratamientos de residuos.

Una vez tratados, los lodos pueden ser sometidos a otras operaciones de tratamiento finalistas que aseguran un destino final adecuado y ambientalmente seguro.

4.1. Tratamientos de las aguas residuales y los lodos de una EDAR.

En esencia, una Estación Depuradora de Aguas Residuales busca reducir la contaminación. Por ello, cuando nos referimos a una EDAR, debemos tener en cuenta la agrupación de instalaciones dedicadas a que el agua alcance un mínimo de calidad. Como ya se ha visto, el mínimo de calidad aceptable es un concepto que ha evolucionado para ser cada vez más exhaustivo.

Se definen aguas residuales aquellas cuya calidad se ve afectada por la actividad humana, y se clasifican en urbanas, domésticas e industriales, según su procedencia.

El objetivo es devolver este recurso después del tratamiento adecuado, de nuevo, al ciclo del agua, ya sea mediante su vertido a cauces de agua o bien para su reutilización en agricultura después del conveniente tratamiento de regeneración.

En primer lugar, la EDAR recibe las aguas residuales a través de las redes de alcantarillado. Una vez se han recogido las aguas residuales, estas se someten a procesos de tipo físico, químico y biológico para tratar de reducir y eliminar sus sustancias contaminantes.

En la siguiente figura se muestra un esquema del tratamiento general de las aguas residuales y de los lodos de depuración, que desarrollaremos más adelante. (*Las 4 etapas de las plantas de tratamiento de aguas residuales - IDRICA, 2022*); (*Lodos de depuración de aguas residuales*)

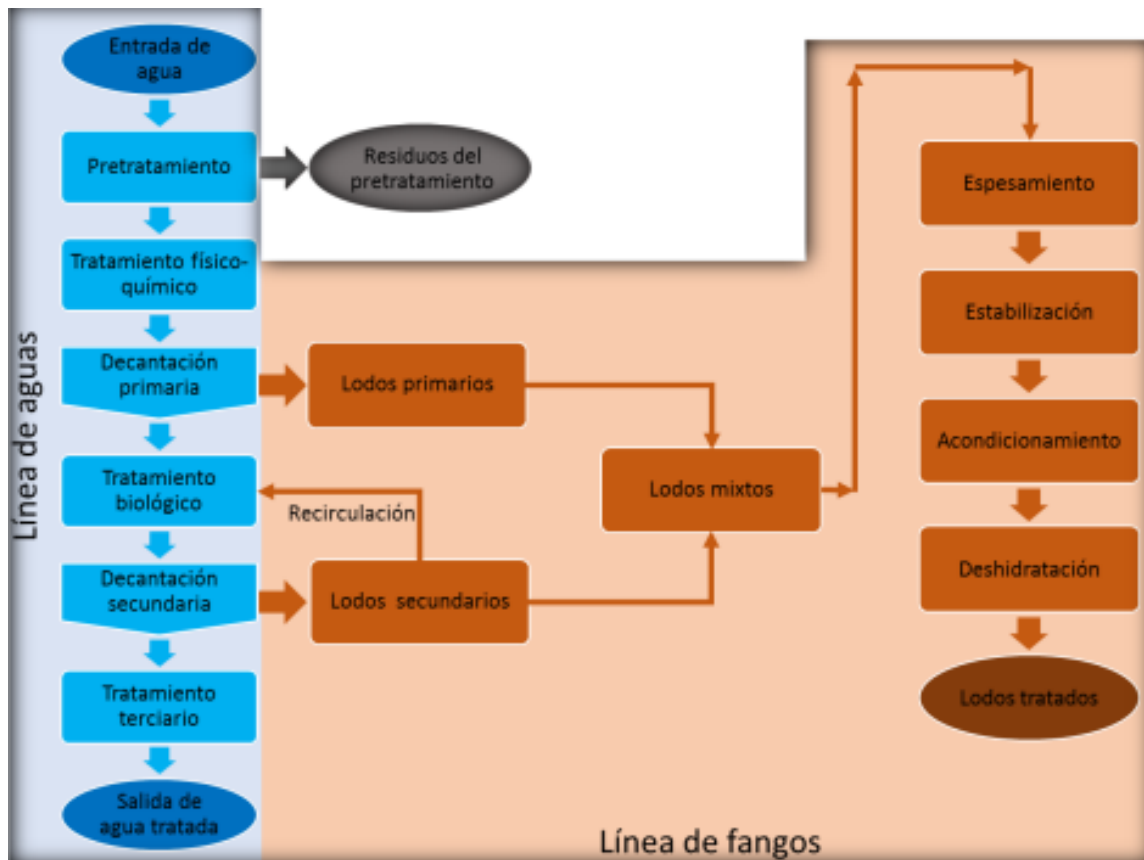


Figura 8: Esquema general del tratamiento de lodos de depuración de una EDAR.

El tratamiento de las EDAR generalmente se distribuye en 4 etapas:

- I. Pretratamiento: El tratamiento preliminar es la etapa que da comienzo a la depuración de las aguas residuales y sirve para mejorar el rendimiento de las siguientes etapas. En esta etapa se eliminan objetos ó materias que puedan dañar la instalación y los equipos que se usarán a lo largo del proceso de depuración.

Durante esta etapa, primero tiene lugar un proceso de:

1. Pozo de gruesos:

En la figura 9 podemos observar un pozo de gruesos. Es una instalación que recibe el agua residual de las EDAR y tiene por objeto retirar objetos voluminosos pesados y las arenas de mayor tamaño para proteger de desgaste tanto a las bombas de elevación como a las tuberías de impulsión. Los sólidos caen al fondo del mismo en un tiempo mínimo. Posteriormente esos sólidos retenidos se retiran mediante una cuchara bivalva hidráulica.



Figura 9: Pozo de gruesos.

2. Desbaste y tamizado:

Del pozo grueso se bombea el agua a los canales de reparto pasando previamente por un primer cribado, en el que se extraen los sólidos de mayor tamaño existentes en el efluente, ya sean papeles, plásticos u otros objetos arrastrados por la corriente. Normalmente se emplean rejas de gruesos y finos. Se consigue así protección frente a objetos capaces de destruir las distintas unidades posteriores de la planta.



Figura 10: Fase de pretratamiento de aguas residuales. Desbaste y tamizado

La figura 10 muestra una reja de gruesos en la que se requieren las materias de mayor tamaño. La separación de sus rejas es de 12 – 22 mm mientras que en una reja de finos la separación es de 6 -12 mm. La suciedad acumulada provoca una disminución de la luz de paso, lo que provoca un aumento de la pérdida de carga (esto implica la necesidad de

extracción de residuos periódicamente). Cuanto menor sea la luz de paso, mayor será la pérdida de carga que se origina.

3. Desarenado y desengrasado:

Es un proceso de separación sólido – líquido. Consiste en la extracción de arena y partículas minerales más o menos finas del agua, para evitar la deposición, atasco y sobrecarga de las mismas, consiguiendo así prolongar la vida de los equipos, ya que estos materiales son muy abrasivos.

Durante el desarenado se inyecta aire para conseguir separar los áridos de la materia orgánica. El desarenador se diseña para eliminar las partículas de arena de tamaño superior a 0,2 mm, con un rendimiento de eliminación del 90%. Las partículas de tamaño inferior a 0,2 mm se separarán posteriormente en el decantador, y no en el desarenador.



Figura 11: Pretratamiento de aguas residuales. Canal y carro desarenador en funcionamiento.

El desengrasado consiste en un proceso de separación líquido-líquido o sólido-líquido, el cual extrae del agua las grasas y aceites que estén emulsionadas con la misma, evitando así que estos compuestos lleguen al proceso biológico y a la decantación primaria, mejorando el rendimiento de los mismos. Además, las grasas podrían dificultar el bombeo.

Los aceites y grasas son más ligeros que el agua, por lo que suben hasta la superficie. Al usar burbujas de aire se facilita la separación del agua ya que las partículas de grasas son hidrófobas. Finalmente, los elementos sobrenadantes se extraen con rasquetas,

llevándolo al contenedor correspondiente. Este proceso, en la mayoría de los casos, se realiza conjuntamente con el de desarenado, como se puede ver en la figura 11.

Los residuos procedentes del pretratamiento se almacenan con el resto de los residuos para su correcta gestión en vertedero.

II. Tratamiento primario: Tras la etapa de pretratamiento, el siguiente paso sería eliminar una porción de los sólidos suspendidos y parte de la materia orgánica. Para ello, se somete el agua a tratamientos: (Bluegold, 2020)

- Físicos: el agua queda retenida durante 2-3 horas en decantadores (Figura 12) para que la gravedad ayude a separar esas partículas. Proceso que se conoce como decantación primaria.

Los tipos de decantadores son muy variados (circulares, rectangulares, cuadrados, lamelares). Se llega a conseguir un rendimiento del 65% para la eliminación de sólidos en suspensión y del 30 % para la materia orgánica, con poco coste energético. En zonas de clima frío aumenta la viscosidad del agua y disminuyen los rendimientos.

- Físico - Químicos: se suelen añadir algunos agentes coagulantes (desestabilizan las partículas coloidales por dosificación de sales metálicas), y floculantes (agregación de partículas desestabilizadas mediante electrolitos) para facilitar el proceso de separación y mejorar la sedimentación de los sólidos, así como eliminar el fósforo. Es un tratamiento que supone un mayor coste económico de explotación y una mayor depuración.
- En algunos casos se suele emplear sustancias básicas o ácidas para neutralizar el pH del agua. Otros beneficios de este proceso son la homogeneización de caudal y la eliminación de materia orgánica asociada a sólidos suspendidos.



Figura 12: Decantador primario vacío.

De esta decantación primaria obtenemos lo que se conoce como lodos primarios. Tras un periodo de retención hidráulica (TCH) que puede ser de 3 a 8 horas se recogen mediante una rasqueta que puede ser longitudinal, como se puede observar en la figura 12, o radial.

- III. Tratamiento secundario: El objetivo de esta etapa de tratamiento es la eliminación de la materia orgánica del agua, así como de nutrientes tales como el nitrógeno (N) y el fósforo (P), mediante un tratamiento biológico en el que se emplea la ayuda de bacterias aerobias y otros microorganismos.

El tratamiento más generalizado es el de los fangos activados, que consiste en contener el agua a tratar, para procesos de depuración de media carga en los que la edad media del fango oscila entre 3 y 5 días en condiciones variables de oxígeno (condiciones aerobias, anóxicas y anaerobias) en tanques de agua compartimentados, consiguiéndose rendimientos del 90%.



Figura 13: Decantadores secundarios en funcionamiento.

Una vez se ha realizado el proceso biológico, se realiza una decantación, conocida como decantación secundaria. Gracias a los decantadores secundarios (figura 13), en esta fase del tratamiento se recirculan parte de los fangos secundarios al reactor de fangos activos (figura 14) para incrementar el número de bacterias y, de esta manera incrementar el rendimiento del proceso. El tratamiento secundario requiere un elevado consumo energético debido a la necesidad de inyectar el aire demandado para proporcionar el oxígeno suficiente y así mantener en óptimas condiciones el proceso aeróbico de los fangos activos. Esto implica un elevado coste económico.



Figura 14: Reactor de fangos activos funcionando y sin funcionar.

En esta segunda decantación, las bacterias que se han desarrollado en el proceso anterior precipitan a la parte inferior del decantador ocasionando una mezcla de agua y sólidos que se denominan fangos biológicos. De esta mezcla, parte se recircula y parte se extrae o purga como fangos en exceso por la parte inferior del decantador y permite que por la parte superior salga el agua depurada ya sin la mayoría de las bacterias y sólidos, dando lugar al agua clarificada. (figura 15)



Figura 15: Decantación secundaria.

Lo habitual en las plantas depuradoras es que el tratamiento del agua termine en este punto, siempre que el agua tratada cumpla con los requisitos de vertido definidos por la Directiva ARU 91/271 modificada por la Directiva 98/15/CE, que define los sistemas de recogida, tratamiento y vertido de las aguas residuales urbanas. Esta Directiva ha sido transpuesta a la normativa española por el R.D. Ley 11/1995, el R.D. 509/1996, que lo desarrolla, y el R.D. 2116/1998 que modifica el anterior.

- IV. Tratamiento terciario: En esta etapa se busca aumentar la calidad final del agua para devolverla al medioambiente (mar, ríos, lagos y demás cuencas hidrográficas) y en algunos casos para ser usada en distintas actividades humanas. (reutilización del agua: baldear calles, jardinería etc.) Por ello, se realizan una serie de procesos con el objetivo principal de eliminar agentes patógenos y otros contaminantes.

Los procesos terciarios generalmente son el resultado de diferentes combinaciones entre distintas tecnologías. La elección de los procesos dependerá de los tratamientos primarios y secundarios implementados, y de la calidad de las aguas para su uso posterior que depende de la legislación vigente.

Las diferentes tecnologías para los procesos de tratamiento terciario pueden ser:

- Fisicoquímicos: operación para eliminar la materia en suspensión utilizando operaciones mecánicas y aditivos químicos, como coagulación, floculación y decantación lamelar (sedimentación)
- Filtración: operación en la que el agua pasa a través de un medio poroso, reteniendo la mayor cantidad posible de materia en suspensión. Puede ser por filtración profunda o superficial.
- Flotación con aire disuelto: operación que consiste en generar burbujas de gas, donde el aire de la burbuja contiene las partículas presentes del agua tratada que se elevan hasta la superficie y salen del procesado.
- Oxidaciones avanzadas: operación para degradar compuestos orgánicos en medio acuoso.
- Membranas de filtración: operación que se basa en impedir por exclusión el paso a través de la membrana de contaminantes de mayor tamaño que el diámetro de poro de la membrana. Por un lado, se distinguen la fuerza impulsora generada por el diferencial de presión transmembrana en microfiltración, ultrafiltración, nanofiltración, ósmosis inversa y, por otro lado, la electrodiálisis, cuya fuerza impulsora es el diferencial de potencial eléctrico transmembrana.
- Desinfección: operación que consiste en destruir o inactivar los microorganismos que puedan causar enfermedades. Se puede distinguir el uso de la radiación ultravioleta, cloración y ozonización.

4.2. Obtención de fangos y tratamientos.

El principal subproducto del tratamiento de las aguas residuales son los fangos, extraídos como residuos de las decantaciones primaria y secundaria. (*Línea de fangos*)

En primer lugar, se lleva a cabo una etapa de espesamiento de los lodos. Con el espesamiento se pretende reducir el volumen de agua a tratar con la consiguiente optimización de los procesos existentes aguas abajo.

Los espesadores suelen estar cubiertos y se tiende a desodorizarlos para evitar malos olores. El espesamiento puede hacerse por gravedad o por flotación:

1- Fangos primarios procedentes de la decantación primaria.

Se conducen al espesador y se espesan por gravedad. Es un proceso físico por el cual se separan las partículas cuyo peso específico es mayor que el del agua, por la acción de la gravedad. Existen varios tipos de sedimentación: clase 1,2,3 y 4 (mayor concentración del sólido separado al aumentar el número de clase)

Los parámetros de diseño implicados son la velocidad ascensional, tiempo de retención y carga de sólidos.

En el espesador, el fango diluido se lleva a una cámara de alimentación donde sedimenta, se compacta y se extrae.

2- Los fangos en exceso procedentes de la decantación secundaria.

Se espesan por flotación, con el objetivo de reducir el volumen del fango. El espesamiento por flotación es un proceso de separación sólido-líquido, que actúa sobre sólidos con densidad muy parecida a la del agua. Se realiza por flotación ya que habría una gran dificultad de concentración por sedimentación o gravedad, puesto que son mucho más ligeros que los primarios. Se añade inicialmente un floculante para facilitar así la separación.

- Una vez han espesado los fangos biológicos procedentes de la decantación primaria y los fangos de la decantación secundaria, se juntan para formar los fangos mixtos.

Posteriormente, estos fangos mixtos son recogidos en arquetas y se conducen al digestor, (figura 17) donde se digieren y se tratan mediante un proceso biológico anaerobio (en ausencia de oxígeno) para conseguir estabilizar los lodos.



Figura 16: Digestor Anaerobio.

3- Procesos biológicos anaerobios.

Tratan de degradar la materia orgánica en ausencia de oxígeno. Se emplea para estabilizar el fango, transformándolo en un producto adecuado para su disposición final o procesado con otros tratamientos.

Tradicionalmente se instalaba en plantas grandes, pero actualmente se instalan en plantas de menor tamaño por motivos económicos (aprovechamiento del gas de la digestión).

Este proceso no requiere aporte de oxígeno, por lo que supone una ventaja económica, y permite emplear el metano (CH_4) generado durante la digestión como combustible, con un lodo que se encuentra ya estabilizado.

Por otro lado, requiere un largo periodo de arranque si no se usa inóculo, es muy sensible a las variaciones ambientales y su eficiencia en la eliminación de materia orgánica es menor que en los procesos aerobios.

El fango está compuesto principalmente por carbohidratos, lípidos y proteínas. En la siguiente figura se muestran los distintos pasos de digestión anaerobia.

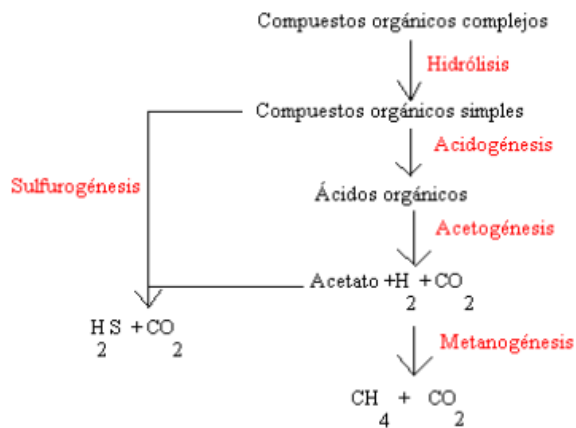


Figura 17: Reacciones químicas desarrolladas durante el proceso de digestión anaerobia.

Durante el proceso biológico de digestión anaerobia de los fangos hay que tener en cuenta una serie de condicionantes:

- Arranque: se llena el depósito inicialmente con agua no residual, luego se agita y se calienta por intercambiador de calor. Posteriormente se hace la siembra con fangos y más adelante se produce el rebose de ese fango, el cual se retira. El fango produce gas, mayoritariamente metano (CH₄), si la concentración de metano es muy pequeña, no se puede usar para caldera o para cogeneración.
- Temperatura: Según la temperatura, la digestión anaerobia se clasifica en tres tipos:
 - Psicofílica (T^a < 20°C)
 - Mesofílica (20-40 °C)
 - Termofílica (T^a > 40°C)

Las bacterias son las mismas, pero según la temperatura, la cinética es más o menos alta. Al disminuir la temperatura puede haber problemas de acidificación pues faltarían bacterias metanogénicas. El sistema mesófilo es el más extendido y su temperatura óptima de funcionamiento, la cual conlleva la máxima actividad en el crecimiento de bacterias metanogénicas, es de 35°C, por otra parte, en este proceso es preciso la ausencia total de oxígeno disuelto.

- Mezcla: necesaria para homogeneizar el medio. Evita la sedimentación y formación de zonas muertas. Para mezclar se pueden usar distintos métodos:
 - Agitación con la recirculación del mismo gas producido, usando compresores.
 - Agitación con la recirculación del lodo, usando bombas de lodos.

- Agitación mecánica, usando hélices, lo cual conlleva un menor consumo energético.
- Tiempo de retención óptimo: según las temperaturas de operación, para una misma unidad de carga orgánica en el sistema, se establecen distintos tiempos óptimos de degradación de ésta. Para sistemas mesófilos se establece un tiempo mínimo de retención hidráulico de 25 a 30 días.
- Tóxicos: son sustancias que por su concentración pueden inhibir el proceso de digestión en alguna de sus fases. Pueden ser:
 - Externos: entran al sistema de alimentación (sulfatos, amoníaco, oxígeno, metales pesados).
 - Internos: debido a desequilibrios del sistema, como el aumento de la concentración del H₂S.
- pH: el pH óptimo debe estar entre 6 y 8 para evitar la inhibición de las bacterias metanogénicas. En la fase de arranque puede ser inferior al predominar la fase acidogénica frente a la metanogénica.
- Acidez: Los ácidos a tener en cuenta son los que participan en el proceso (fórmico, acético, butírico y valérico). Un incremento de los organismos reflejaría un fallo en las reacciones metabólicas de los microorganismos. Se establecen valores inferiores a 500 mg de ácido/ litro como los valores más ajustados en un digester estabilizado.
- Alcalinidad: importante debido a su capacidad tampón para evitar así la inhibición de la actividad bacteriana amortiguando la variación del pH. El valor máximo para la relación acidez/basicidad es de 0,3-0,4

La eliminación de materia orgánica se da en la etapa final metanogénica, donde se forma metano reduciendo así la carga orgánica del efluente. Los reactores anaerobios pueden ser de distintos tipos:

- Con biomasa suspendida.
- Con biomasa adherida.

El sistema debe estar agitado, aportándosele calor por las calderas o quemadores. Se evita que entre aire por el sistema de vasos comunicantes. Los parámetros de operación son menos exigentes para aguas residuales urbanas que para las industriales.

La digestión anaerobia puede intensificarse mediante la aplicación de ultrasonido, de tal forma se consiguen las siguientes ventajas:

- Aumento de la producción de biogás.
- Mejor degradación del material orgánico.
- Mejora de la deshidratación del lodo.
- Reducción del tamaño del digestor.

4- Composición y producción del biogás:

La composición varía en función de las características de la materia orgánica en la alimentación. En general, para estaciones depuradoras de aguas residuales urbanas, la composición es la siguiente:

- Metano (CH₄): 60–75 %
- Dióxido de carbono (CO₂): 20–30 %
- Agua (H₂S), Amoniac (NH₃) y Sulfuro de hidrógeno (H₂S): 5-10 %

La medición del CO₂ es importante ya que nos da información sobre la estabilidad de la digestión. Tiene relación con la acidez y alcalinidad

5- Acondicionamiento de lodos:

Consiste en un tratamiento químico o térmico del lodo para mejorar su eficiencia de deshidratación. Se prepara al lodo para su deshidratación posterior. Lo más habitual es el acondicionamiento químico con polielectrolitos orgánicos.

- Tratamiento químico: es bastante rentable debido al aumento de la producción y a la mayor flexibilidad. Permite reducir drásticamente la humedad del fango. Da lugar a la coagulación de los sólidos a tratar y a la liberación del agua absorbida. (los lodos quedan espesados, como una especie de chocolate líquido).
- Tratamiento térmico: estabilización y acondicionamiento del fango por calentamiento durante cortos periodos de tiempo.

6- Deshidratación:

Operación física empleada para reducir la humedad del fango como consecuencia de los siguientes motivos: (*La deshidratación de fangos / Formación de ingenieros*)

- Menor coste en el acondicionamiento y transporte del fango.
- Es más fácil de manipular que un fango líquido o espesado.
- Proceso necesario antes tanto de la incineración del fango, como antes del compostaje.
- Necesario para evitar la generación de malos olores.
- Reduce la producción de lixiviados si se evacua el fango a vertedero.

Para deshidratar, se puede usar bien la centrifugación o filtros banda. Los filtros bandas no son tan efectivos y actualmente se deshidrata con centrifugas.



Figura 18: Deshidratación del fango por centrifugación.

En la Figura 18 se observa el proceso de deshidratación del fango por centrifugación, la separación se realiza en un recipiente cilíndrico horizontal equipado con un transportador de tornillo. La alimentación entra en la cuba a través de un tubo de entrada estacionario y es acelerada suavemente por un distribuidor de entrada. La fuerza centrífuga que resulta de la rotación causa sedimentación de los sólidos en la pared de la cubeta. El transportador gira en la misma dirección que la cubeta, pero un poco más lento, moviendo así los sólidos hacia el extremo cónico de la cubeta. La torta sale de la cubeta a través de las aberturas de descarga de sólidos.



Figura 19: Espesador centrífugo de fangos.

Una vez que los fangos han sido deshidratados y tienen las propiedades adecuadas se conducen al depósito de fangos deshidratados para su almacenamiento. En la siguiente figura podemos ver dos de estos depósitos de una E.D.A.R



Figura 20: Depósito de fangos deshidratados.

7- Cogeneración:

La cogeneración consiste en el aprovechamiento energético del gas procedente de la digestión anaerobia, generando energía eléctrica y térmica, a través de la instalación de motores y turbinas de gas.

Gracias a su mayor simplicidad y a las características de las instalaciones, en las EDAR se emplean normalmente motores de gas. Este tipo de instalaciones cuentan con:

- Depósito acumulador de gas.
- Compresor de gas.
- Sistemas de acondicionamiento (trampas de agua y aceite)
- Motor de gas y alternador.
- Sistemas de refrigeración de motores (intercambiadores de calor)
- Instalación eléctrica.

El biogás producido por una EDAR también se usa para mantener la temperatura adecuada en los digestores, quemándolo en calderas y eliminando el exceso por combustión en antorcha.

El rendimiento global del sistema de cogeneración al observar el balance energético es alto (85,5%) con un 32 % en forma de energía eléctrica y el 53,6 % restante como calor aprovechable.

En la figura 21 se observa los diferentes procesos que tienen lugar una vez se recogen los fangos primarios y secundarios en la arqueta de fangos mixtos. En esa arqueta se mezclan los fangos primarios procedentes de los espesadores por gravedad y el secundario de los de flotación por medio de dos electroagitadores formando el fango mixto que será impulsado directamente a los digestores mediante las bombas de tornillo helicoidal instaladas en un edificio cubierto adosado a dicha arqueta.

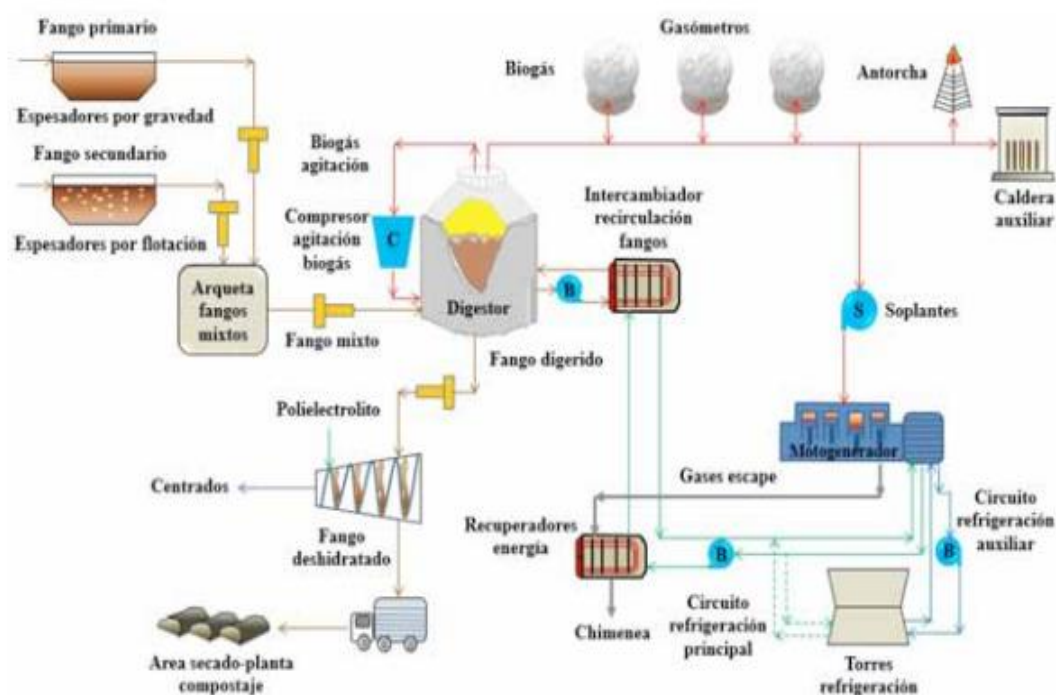


Figura 21: Esquema general del proceso de obtención de biogás, energía eléctrica y fango deshidratado.

Una vez que estos fangos cumplen con los requisitos de sequedad y contenido en metales pesados, nutrientes y patógenos, deben gestionarse con el menor impacto para el medio ambiente. En España el 90% de su reutilización es en agricultura como fertilizante.

4.3. Composición de los lodos de una EDAR.

Para prever el impacto ambiental de un lodo es necesario conocer la naturaleza de este. Del mismo modo, para poder realizar los tratamientos oportunos, es necesario conocer las características y composición de los lodos que formarán parte del proceso.

Los factores principales que definen las características de los lodos son:

- La composición química del agua tratada.
- El producto obtenido al adicionar el reactivo empleado en el proceso de tratamiento.
- El tiempo de reacción.
- La capacidad de floculación.

La composición de los lodos es muy variable y normalmente las grandes depuradoras realizan análisis periódicos de la composición de los lodos generados.

Con carácter general, los lodos procedentes de depuradoras de aguas residuales (EDARs) contienen la siguiente composición, que varían en función de los factores ya mencionados. («Composición de lodos», 2023)

Tabla 1: Composición general de lodos tratados en una EDAR.

Parámetros ²	Lodos primarios	Lodos secundarios (mezcla)	Lodos digeridos
pH	5.5-6.5	6.5-7.5	6.8-7.6
Contenido de agua (%)	92-96	97.5-98	94-97
SSV (%SS)	70-80	80-90	55-65
Grasas (%SS)	12-14	3-5	4-12
Proteínas (%SS)	4-14	20-30	10-20
Carbohidratos (%SS)	8-10	6-8	5-8
Nitrógeno (%SS)	2-5	1-6	3-7
Fósforo (%SS)	0.5-1.5	1.5-2.5	0.5-1.5
Bacterias patógenas (NMP/100ml)	103-105	100-1000	10-100
Metales pesados (%SS) (Zn, Cu, Pb)	0.2-2	0.2-2	0.2-2

SSV: Sólidos Suspendidos Volátiles, NMP: Número Más Probable, SS: Sólidos Suspendidos.

Las características del lodo que afectan a su aptitud para la aplicación al suelo incluyen los contenidos en materia orgánica, nutrientes, patógenos, metales y compuestos orgánicos tóxicos. Es necesario que los lodos que se vayan a utilizar en suelo agrícola cumplan con la legislación vigente (RD 1310/1990 y AAA/1072/2013) como bien refleja el punto 3 del trabajo correspondiente a la legislación en materia de lodos. Dicho RD regula las características mínimas del lodo para poder ser aplicado en agricultura. Según este Real Decreto, los parámetros que deben ser analizados son: (*Composición general de los lodos de depuradora*)

- La materia orgánica.
- La materia seca.
- PH.

- Nitrógeno.
- Fósforo
- Metales pesados (Cd, Cu, Ni, Pb, Zn, Hg y el Cr).

El Nitrógeno (N) es uno de los nutrientes esenciales para el metabolismo del suelo y la nutrición de las plantas, por lo que es uno de los parámetros de mayor interés. Existe una gran variabilidad entre los valores en las diferentes plantas, oscilando los valores medios entre 3,5 y 4,5. Sin embargo existen muestras con porcentajes entre 1 – 2,5%, relacionadas, en general, con valores de pH altos que facilitan la pérdida del N en forma amoniacal, si bien en algún caso podrían deberse a tiempos de secado de la muestra muy prolongados.

Para el potasio (K) asimilable, los valores varían en función de las EDAR hasta valores máximos de 6.000 mg/kg de materia seca, aunque la mayoría están en rangos de alrededor 1.500 mg/ kg de materia seca.

Junto con el nitrógeno (N) y el potasio (K), se encuentra el fósforo (P) como uno de los macronutrientes en los que se basa el cálculo de la dosis de fertilizantes. Los valores de fósforo (P) asimilable varían entre 500 y 5.800 mg / kg de materia seca, aunque los generados en las EDAR de la CAM suelen estar entre los 1.500 y 3.000 mg / kg de materia seca.

Tabla 2: Lodos utilizados en agricultura en España. Valor medio de concentración (mg/kg de materia seca)

LODOS UTILIZADOS EN LA AGRICULTURA EN ESPAÑA			
Valor medio de concentración (mg/kg de materia seca)			
Parámetros	2016	2017	2018
METALES			
Cadmio	1	2	1
Cobre	250	249	252
Níquel	33	35	28
Plomo	36	50	46
Zinc	662	763	666
Mercurio	1	2	2
Cromo	63	79	52
ELEMENTO			
Nitrógeno total	50.000	50.000	60.000
Fósforo total	44.306	37.860	39.846

La tabla 2 muestra los valores medios de concentración de lodos utilizados en España durante esos años. (*Composición general de los lodos de depuradora*)

La Orden AAA/1072/2013 amplía los parámetros agronómicos del lodo e incluye el nitrógeno amoniacal, el calcio total, el magnesio total, y el hierro. Además, incluye la obligatoriedad de analizar los parámetros microbiológicos como Salmonella y Ecoli.

Respecto a los metales pesados, dichos valores deben ser inferiores a los límites establecidos (tabla 4) del R.D. 1310/90 para que los lodos sean aptos para su aplicación en suelos agrícolas.

En el lodo también existen patógenos. El contenido en patógenos de un lodo es especialmente importante cuando su destino es de aplicación en suelos de uso agrícola. La inactivación de los patógenos se puede conseguir mediante procesos térmicos, químicos y biológicos. En el caso de los tratamientos térmicos, la efectividad del proceso viene determinada por el tiempo de residencia y la temperatura.

4.4. Caracterización y aceptación de los suelos a esos lodos.

Para que la gestión del lodo mediante aplicación al suelo sea sostenible se requiere la búsqueda de buenos terrenos y próximos al lugar de generación de los mismos. Las características físicas que determinan si un terreno se considera bueno o no son:

- La topografía e hidrología.
- La permeabilidad del suelo.
- El drenaje.
- La profundidad hasta el nivel freático.
- La geología superficial.
- La accesibilidad al mismo.
- pH

Una vez seleccionado el suelo, la legislación (RD 1330/1990) obliga a analizar el pH y los metales pesados (Cd, Cu, Zn, Hg, Cr) del suelo, permitiendo que cada Comunidad Autónoma decida la frecuencia de análisis en función de los datos disponibles sobre la composición del suelo y su homogeneidad.

La siguiente tabla muestra los valores límite de concentración de metales pesados en los suelos (mg/kg de materia seca) de una muestra representativa de los suelos tal y como lo define el anexo II C del RD 1310/1990). (*Tratamiento de Lodos*, 2014)

Tabla 3: Valores límite de concentración de metales pesados en los suelos según el RD 1310/1990.

VALORES LIMITE		
Parámetros	Suelos con pH <7	Suelos con pH > 7
Cd	1	3
Cu	50	210
Ni	30	112
Pb	50	300
Zn	150	450
Hg	1	1,5
Cr	100	150

Además, según el Real Decreto 1051/2022, de 27 de diciembre, por el que se establecen normas para la nutrición sostenible en los suelos agrarios, sin perjuicio de que las autoridades competentes de las comunidades autónomas puedan poner límites más estrictos, y salvo en los suelos de origen volcánico de Canarias, se modifican los límites máximos de metales pesados en los suelos agrarios, quedando hasta el momento los siguientes valores límite que se reflejan en la tabla 4.

Tabla 4: valores límite de concentración de metales pesados en los suelos según el RD 1051/2022 para la nutrición sostenible en los suelos agrarios.

Metales pesados	Valores límite en el suelo (mg/kg ms)	
	pH suelo <7	pH suelo ≥7
Cadmio (Cd).	1	1.5
Cobre (Cu).	50	100
Níquel (Ni).	30	70
Plomo (Pb).	50	100
Zinc (Zn).	150	200
Mercurio (Hg).	0.5	1

En resumen, para que un lodo pueda aplicarse a un suelo, primero el suelo debe estar en disposición según el RD de aceptar esos lodos (Tabla 3 y 4). Si lo está, para poder aplicar lodos, estos deben cumplir con los siguientes valores límite (Tabla 5 y 6) para su aplicación en agricultura.

Tabla 5: Valores límite establecidos por RD 1310/1990 para la aplicación de lodos EDAR en agricultura.

VALORES LIMITE		
Parámetros	Suelos con pH <7	Suelos con pH > 7
Cd	20	40
Cu	1000	1750
Ni	300	400
Pb	750	1200
Zn	2500	4000
Hg	16	25
Cr	1000	1500

Del mismo modo, para la aplicación de lodos en agricultura, según el Real Decreto 1051/2022, de 27 de diciembre, por el que se establecen normas para la nutrición sostenible en los suelos, de forma general, y salvo que existan disposiciones específicas, ningún material que se aporte al suelo podrá superar los valores de metales pesados que se recogen en la siguiente tabla, aumentándose así algunos valores límite establecidos en la tabla 5.

Tabla 6: Valores límite establecidos por RD 1051/2022 para la aplicación de lodos EDAR en agricultura.

Metales pesados	Valores límite (mg/kg ms)	Valores límite (mg/kg ms) a los que se refiere artículo 8.2
Cadmio (Cd).	10	0,2
Cobre (Cu)*.	1000	20
Níquel (Ni).	300	6
Plomo (Pb).	750	15
Zinc (Zn)*.	2500	50
Mercurio (Hg).	10	0,2
Cromo hexavalente (Cr VI).	2	No detectable
Arsénico inorgánico (As).	40	0,8

4.5. Cantidad máxima de lodos / ha que se puede aplicar al suelo.

Como ya sabemos, en el caso de los lodos de depuración aplicados al sector agrícola, el principal factor limitante para su uso es el contenido en metales pesados.

Según el Real Decreto 1310/1990, de 29 de octubre, por el que se regula la utilización de los lodos de depuradora en el sector agrario, en el Anexo 1C se establece que las

cantidades máximas de lodos que podrán aportarse al suelo por hectárea y año serán las que, de acuerdo con el contenido en metales pesados de los suelos y lodos a aplicar, no rebasen los valores límite de incorporación de los metales pesados establecidos en la tabla 7.

Tabla 7: Cantidades máximas de lodos que podrán aportarse al suelo por ha y año (RD 1310/1990)

Metal	Cantidades máximas anuales de metales añadidas al suelo basadas en un una media de 10 años
(total)	Valores límite (g/ha/año)
Cd	150
Cu	12000
Ni	3000
Pb	15000
Zn	30000
Cr	3000
Hg	100

Además, a la hora de establecer las dosificaciones y cantidades máximas de lodos aplicar al suelo, se debe tener en cuenta lo establecido en el Real Decreto 1051/2022, de 27 de diciembre, por el que se establecen normas para la nutrición sostenible en los suelos agrarios. Este Real Decreto, con el fin de asegurar la fertilidad de los suelos agrarios y para garantizar la seguridad de los productos agrícolas, establecen unos límites máximos de metales pesados que se pueden incorporar al año por unidad de superficie y que se recogen en la siguiente tabla.

Tabla 8 : Cantidades máximas de lodos que podrán aportarse al suelo por hectárea y año según RD 1051/2022.

Metales pesados	Valores límite (g/ha/año)	Valores límite (g/ha/año) a los que se refiere art. 8.2
Cadmio (Cd).	150	3
Cobre (Cu).	2400	48
Níquel (Ni).	600	12
Plomo (Pb).	1500	30
Zinc (Zn).	6000	120
Mercurio (Hg).	150	3

Al comparar ambas tablas (7 y 8) podemos apreciar un cambio significativo en los valores límite de Zinc, Plomo y Níquel, disminuyendo los valores límite para ser la normativa cada vez más estricta.

Para el cálculo de los valores de metales pesados se deberán considerar todos los productos y materiales que se aporten al suelo y al cultivo a lo largo de un año, incluidos los regulados en este real decreto.

El cálculo de la dosis máxima de aplicación se basa en el contenido y tipo de materia orgánica de los lodos, el contenido en metales pesados de los lodos y en los materiales de partida, lo que condicionará el contenido de metales en los suelos enmendados con lodos. La dosificación del lodo no debe superar los niveles de metales máximos fijados en la Normativa.

Debido a esto, se calculan:

- Dosis de aplicación: se calculan teniendo en cuenta el contenido en nutrientes del lodo y la capacidad de absorción de nutrientes en planta.
- Dosis óptima por ha: para calcularla se debe de averiguar el factor limitante.
- Superficie máxima de aplicación de lodos o superficie de suelo necesaria para para aplicar la totalidad de los lodos producidos en planta: se calcula, al igual que la dosis óptima, teniendo en cuenta el factor limitante.

4.6. Destino final de los lodos de depuración de una EDAR.

Según datos del Registro Nacional de Lodos, en el año 2020 aproximadamente el 82% de los lodos generados se han utilizado con destino agrícola. Actualmente se ha conseguido reducir en gran medida el depósito de estos en vertedero (aproximadamente un 7%), y la incineración para valorización energética va creciendo (en torno a un 6%). Otro destino de menor importancia cuantitativa es el uso de los lodos en suelos no agrícolas.

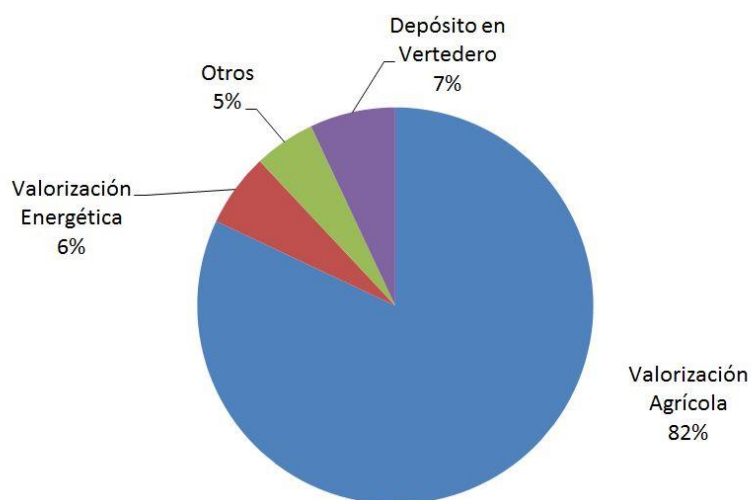


Figura 22: Destino final de los lodos en España. Fuente: Registro Nacional de Lodos.

A nivel autonómico los porcentajes de destino varían, aunque la mayoría de Las Comunidades Autónomas (CCAA) priorizan en los destinos agrícolas únicamente variando su pretratamiento antes de su vertido al suelo. CCAA como Extremadura, Navarra y Castilla León destinan los lodos totalmente a la agricultura. Por otro lado, Aragón y País Vasco destinan los fangos a incineración sin valorización energética y Canarias destina su totalidad a incineración para valoración energética o eliminación a vertedero. (Figura 24. Unidades: %)

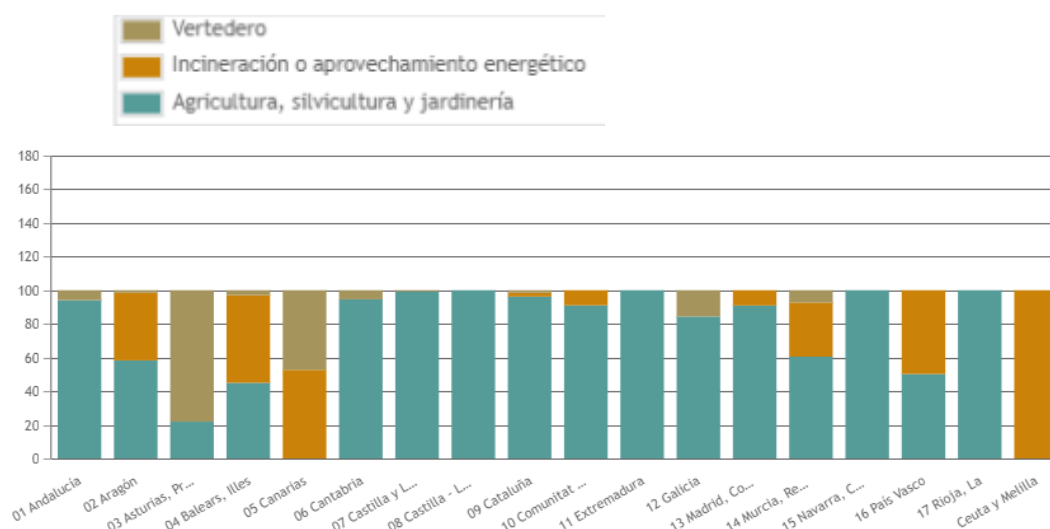


Figura 23: Destino final a nivel Autonómico de lodos EDAR en España. Fuente: Instituto Nacional de Estadística (INE)

4.6.1. Aspectos logísticos previos al reparto en el suelo agrícola.

Uno de los aspectos más problemáticos de la gestión de lodos es compatibilizar una producción continua de lodos durante todo el año con una actividad agrícola sujeta a ciclos. Durante algunas épocas del año, por razones agronómicas o meteorológicas (lluvias...), es necesario almacenar los lodos para su aplicación en el momento más adecuado. Una vez se dispone de la cantidad necesaria, o ha llegado el momento apropiado (cuando el cultivo ya ha sido cosechado y el terreno está suficientemente seco), se procederá a su reparto.

El transporte de lodos a campo debe ser realizado por empresas autorizadas de acuerdo a la Ley de Residuos. Se utilizan camiones dotados de toldos hidráulicos, totalmente estancos, para minimizar las afecciones por olores y lixiviados. En muchos casos estos servicios serán prestados por camiones traccionados para su tránsito por fincas agrícolas.

En la elección de la ubicación de este almacenamiento puntual se deberán contemplar varios condicionantes para evitar afecciones a terceros o sobre el medio ambiente:

distancias a pozos, manantiales y embalses de agua para abastecimiento humano (posible existencia de un perímetro de protección).

Siempre se deberán considerar las condiciones hidrogeológicas locales de forma previa a cualquier almacenamiento para garantizar que no se produzcan afecciones por lixiviados a las aguas subterráneas o a los cauces de aguas superficiales.

5. GENERACIÓN DE LODOS EN LA CAM.

La elevada población de la Comunidad de Madrid y el alto porcentaje de depuración de sus aguas residuales implica la generación de una gran cantidad de lodos de depuradora.

Hasta hace poco, casi la totalidad de los lodos de depuradora de la Comunidad de Madrid, un 98% se generaba en las EDARs del canal de Isabel II y del ayuntamiento de Madrid. Los lodos restantes se generan en depuradoras de grandes urbanizaciones e industrias agroalimentarias.

El canal de Isabel II depuraba en sus instalaciones las aguas residuales de todos los municipios madrileños salvo Madrid capital, Paracuellos del Jarama, Pozuelo de Alarcón, Rivas Vaciamadrid, Leganés y parcialmente Las Rozas, Majadahonda y Alcorcón, que utilizan las instalaciones de depuración de titularidad patrimonial del Ayuntamiento de Madrid.

En la tabla 9 se refleja la producción de lodos en EDARs de titularidad del canal de Isabel II en el periodo 2006 – 2015. El fuerte incremento de los lodos producidos entre los años 2007 y 2008 (del orden de 32.000 t), se debe a la puesta en marcha de la EDAR Arroyo Culebro Cuenca Media – Alta y Arroyo Culebro Cuenca Baja, en las que se comienza a tratar las aguas residuales procedentes de Humanes, Parla, Pinto, Getafe y Fuenlabrada, que hasta esa fecha eran tratadas en la EDAR Madrid Sur del ayuntamiento de Madrid. (*Generación y gestión de lodos en la Comunidad Autónoma de Madrid*)

Tabla 9: Producción de lodos en EDARs de titularidad del Canal de Isabel II en el período 2006-2015.

Año	Lodos (t m.h./año)	Lodos (t m.s. /año)	% humedad de los lodos
2006	185.591	38.474	79
2007 (+)	215.118	43.049	80
2008	217.460	43.697	80
2009	205.433	43.196	79
2010	196.328	44.844	77
2011	193.478	43.763	77
2012	181.508	40.308	78
2013	175.224	39.482	77
2014	182.015	41.948	77
2015	185.058	42.368	77

Fuente: Informes anuales remitidos por el Canal de Isabel II a la Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio de la Comunidad de Madrid.

En ese mismo periodo, la población a la que han dado servicio esas instalaciones se recoge en la siguiente tabla. Nota: La población reflejada en la tabla 10 incluye todos los municipios madrileños salvo Madrid capital, Paracuellos del Jarama, Pozuelo de Alarcón, Rivas Vaciamadrid y Leganés, pero incluye la parte de población de los municipios de las Rozas, Majadahonda y Alcorcón que está servida por las EDARs del Ayuntamiento de Madrid. La población servida por las EDARs del Canal de Isabel II, es, por tanto, ligeramente inferior a la reflejada.

Tabla 10: Población servida por las EDARs de titularidad del Canal de Isabel II en el período 2006-2015.

Año	Población (nº habitantes)
2006	2.063.929
2007	2.607.543
2008	2.727.985
2009	2.794.089
2010	2.844.764
2011	2.882.278
2012	2.918.620
2013	2.938.702
2014	2.937.666
2015	2.736.392

Nota: La población reflejada en la tabla 6 incluye todos los municipios madrileños salvo Madrid capital, Paracuellos del Jarama, Pozuelo de Alarcón, Rivas Vaciamadrid y Leganés, pero incluye la parte de población de los municipios de las Rozas, Majadahonda y Alcorcón que está servida por las EDARs del Ayuntamiento de Madrid. La población servida por las EDARs del Canal de Isabel II, es por tanto, ligeramente inferior a la reflejada.

A la vista de estos datos, cabe destacar que pese al aumento de la población a la que se da servicio, la producción total de lodos en toneladas de materia seca se mantiene estable e incluso con una tendencia descendente a partir del año 2011, produciéndose en el año 2014 aproximadamente unas 2.000 toneladas menos que en el año 2007, debido a mejoras del tratamiento de depuración y del proceso de deshidratación de lodos así como a la disminución de la actividad económica de los últimos años.

De acuerdo con los resultados de estos análisis, cabe destacar que en general, en el período 2006-2015 la calidad de los fangos cumple con la normativa vigente referente a la utilización de lodos de depuración en el sector agrario, siendo reseñable la aparición de concentraciones de metales próximas o superiores a los límites establecidos en Anexo

II del Decreto 193/1998 en las EDARs de Arroyo Culebro, Navarrosillos y Guatén de manera más o menos continua y ocasionalmente en la EDAR de Arroyo de la Vega.

En los últimos años del período (a partir de 2013), se puede afirmar que, en general, se ha reducido notablemente la concentración de metales pesados en los lodos fruto de la mejora del control de los vertidos a la red de saneamiento.

La producción de lodos EDARs llevadas entonces con titularidad del Ayuntamiento de Madrid en ese periodo fueron las reflejadas en la siguiente tabla.

Tabla 11: Producción de lodos en EDARs de titularidad del Ayuntamiento de Madrid en el período 2006- 2015.

Año	Lodos (t m.h./año)	Lodos (t m.s. /año)	% Humedad de los lodos
2006	391.356	83.104	79
2007	315.706	68.092	78
2008	293.371	68.588	77
2009	257.494	61.548	76
2010	258.133	62.317	76
2011	254.057	60.128	76
2012	237.972	56.467	76
2013	236.690	55.608	77
2014	226.332	53.512	76
2015	214.526	50.295	77

La evolución de la población equivalente a la que se ha dado servicio en ese periodo se recoge en la tabla 12.

Tabla 12: Población equivalente servida por las EDARs de titularidad del Ayuntamiento de Madrid en el 2006-2015.

Año	Población equivalente
2006	7.316.360
2007	4.780.280 (*)
2008	4.314.080
2009	s.d.
2010	4.072.510
2011	s.d.
2012	3.943.360
2013	3.915.580
2014	3.897.290
2015	3.694.260

La disminución de población equivalente entre los años 2006 y 2007 se debe a la puesta en marcha de la EDAR Arroyo Culebro Cuenca Media-Alta, y en el 2008 a la de Arroyo Culebro Cuenca Baja, que comenzaron a tratar aguas residuales de municipios del sur de la Comunidad de Madrid que hasta ese momento eran tratadas en instalaciones del Ayuntamiento de Madrid.

A la vista de estos datos, cabe destacar que la cantidad de lodos generados disminuyó, pese a que la población a la que se da servicio (en términos de población equivalente), es prácticamente estable desde 2012 debido a las mejoras en los procesos de tratamiento y a la mejora de los procesos de deshidratación por centrifugado.

A continuación, se agrupan los datos del destino final de ambas fuentes de generación y gestión de lodos (Canal de Isabel II y Ayuntamiento de Madrid), hasta el año 2015. (tabla 13)

Tabla 13: Generación y destino final de lodos (Canal de Isabel II y Ayuntamiento de Madrid) en el periodo 2006-2015.

Año	Aplicación agrícola directa	Secado térmico	Compostaje (*)	Vertedero	Valorización energética
2006	34,27%	61,72%	1,59%	0,99%	1,44%
2007	43,41%	50,73%	1,49%	0,94%	3,43%
2008	45,79%	48,60%	1,17%	1,24%	3,19%
2009	53,11%	42,78%	0,38%	3,62%	0,11%
2010	43,21%	56,33%	0,30%	0,16%	0,00%
2011	40,07%	58,13%	1,79%	0,00%	0,02%
2012	33,05%	63,82%	1,91%	0,00%	1,21%
2013	31,92%	64,58%	3,22%	0,00%	0,29%
2014	75,99%	19,89%	3,12%	0,00%	0,99%
2015	85,88%	7,86%	3,66%	0,14%	2,46%

5.1. Generación y gestión actual de lodos en la CAM.

A partir de 2019 se adjudican dos contratos relativos a la gestión y tratamiento de los lodos procedentes de las ocho depuradoras de Madrid capital. El proceso de licitación tiene un plazo de duración de 3 años y podría prorrogarse hasta un año más.

Uno de los contratos se refiere a la gestión de los lodos y a la explotación de la planta de secado térmico con cogeneración de la Estación Depuradora de Aguas Residuales (EDAR) Sur; y otro a la compra de gas natural para el funcionamiento de la instalación.

Canal ya gestiona los lodos del resto de las depuradoras de la región y los trata en la unidad de tratamiento de Loeches.

Así, a través del primero de los contratos, Canal de Isabel II comenzará a gestionar los lodos producidos en el tratamiento de aguas residuales de las 8 depuradoras de la ciudad de Madrid. (Works)

✚ De este modo, Canal pasa a gestionar el 100 % de los lodos generados en depuradoras de la región.

Estas plantas (de titularidad municipal) pero gestionadas por el Canal de Isabel II, dan servicio a cuatro millones de habitantes y en ellas se producen 220.000 t m.h / año.

Del mismo modo, y para el tratamiento de revalorización de estos residuos, por el mismo contrato Canal de Isabel II se hará cargo de la operación y mantenimiento de la planta de secado térmico con cogeneración de la Estación Depuradora de Aguas Residuales (EDAR) Sur.

A esta instalación, una de las más grandes de Europa, se llevarán los lodos generados en las depuradoras para su tratamiento de secado, higienización y valorización para usos principalmente agrarios.

En 2021 el Canal de Isabel II ha tratado 420.000 toneladas de lodo m.h procedentes de la depuración de aguas residuales. De este volumen:

- 243.000 fueron sometidas a un proceso de secado térmico, tanto en la Unidad de Tratamiento de Lodos de Loeches, como en la instalación ubicada en la Estación Depuradora de Aguas Residuales (EDAR) Sur.
- 159.000 tuvieron una aplicación agrícola directa.
- 18.000 se compostaron.

Gracias al trabajo realizado, el porcentaje de lodos higienizados, es decir, tratados para su recuperación y reutilización por el Canal de Isabel II, fue del 62% en 2021. Para este año en curso el objetivo marcado era llegar al 70%. *(420.000 toneladas de agua residual en 2021 - Canal de Isabel II)*

La gran parte de los lodos de fosas sépticas de la Comunidad de Madrid, son introducidos por los gestores en los procesos de tratamiento de las EDARs, por lo que quedan incorporados al ciclo de gestión dentro de esas instalaciones.

Según los resultados de las analíticas de control que se realizan de forma periódica, la casi totalidad de lodos generados en las depuradoras del Canal de Isabel II se pueden considerar como residuos no peligrosos y, por tanto, ser gestionados como tales.

Prácticamente la totalidad de los lodos del Canal de Isabel II tienen un bajo contenido en metales pesados, por lo que son aptos para ser gestionados mediante aplicación a suelos agrícolas, bien mediante aplicación directa (sin secar) al terreno, o tras ser sometidos a compostaje o secado térmico. Aquellos lodos que no son aptos para ese uso son depositados en vertedero controlado o sometidos a valorización energética.

5.2. Tratamientos de lodos de las EDARs del Canal de Isabel II en la Comunidad Autónoma de Madrid.

Como ya se ha comentado, actualmente el Canal de Isabel II gestiona el 100% de los lodos generados en depuradoras de la región.



Figura 24:EDAR gestionadas por el Canal de Isabel II en la CAM.

En este apartado se describen los tratamientos llevados a cabo en las EDARs del Canal de Isabel II.

Para llevar a cabo el tratamiento de los lodos de depuradora de toda la región, el Canal de Isabel II cuenta con una planta de compostaje y secado térmico con cogeneración de alta eficiencia localizada en Loeches, en activo desde el año 2010.

La planta tiene una capacidad de tratamiento de 155.000 toneladas de materia húmeda de lodos al año:

- 50.000 t m.h./año para compostaje (32%)
- 105.000 para secado térmico. (68%)



Figura 25: Planta de compostaje y secado térmico con cogeneración eléctrica de Loeches.

Gracias al proceso de secado térmico al que se someten los lodos, y para el que es necesario el gas natural (quema de gas), en la actualidad la planta genera más de 75.000 MWh de electricidad al año. El 14% de esta producción cubre la demanda energética de la planta y el resto se vierte y vende a la red.

Esta planta también dispone de vertedero autorizado de residuos no peligrosos con dos celdas de vertido de 7.000 m² e área y 56.000 m³ de capacidad conjunta. A este vertedero autorizado se dirigen de lodos no aptos para uso agrícola. Antes de llevar estos fangos no aptos al vertedero se someten a una fase de compostaje en la que el lodo pasa por una primera maduración y posterior fermentación hasta que alcanza una humedad adecuada para ir a vertedero. Dicha humedad tiene que estar alrededor del 65%.

En este vertedero se almacenan durante un año los restos de la fase de pretratamiento de las aguas residuales (cribado y desarenado) donde esos residuos van lixiviando. Actualmente, se dispone de una planta depuradora de residuos líquidos y lixiviados generados en el Complejo Medioambiental de Gestión de Residuos de la Mancomunidad del Este de Loeches. La depuradora tiene una capacidad hidráulica de hasta 150 m³ /día, lo que permite tratar todo el lixiviado y demás residuos líquidos generados.

Los lixiviados producidos en vertedero se recogen y almacenan en balsas hasta su tratamiento final. El sistema de tratamiento de estos lixiviados consiste en una primera fase físico-química seguida de un sistema concentrativo de ósmosis inversa con módulos de ósmosis en “canal abierto” que hacen imposible la acumulación de ensuciamiento irreversible sobre las membranas durante el proceso, siempre y cuando el sistema trabaje con los parámetros de presión, pH, rendimiento y limpieza química adecuados.

Dado que el proceso de separación de contaminantes por ósmosis inversa es de carácter físico, ésta planta presenta una gran estabilidad y flexibilidad frente a las variaciones que se puedan producir en la calidad del lixiviado, siempre que no superen límites críticos del proceso.

Es un proceso mediante el cual se purifica el agua eliminando las partículas en suspensión y funciona mediante el uso de una bomba de alta presión, forzando el agua a través de la membrana semipermeable, dejando casi todas (alrededor del 95% al 99%) de las sales disueltas en el rechazo. (*Tratamiento de lixiviados Loeches*)

La calidad del permeado, el agua tratada, será siempre excelente, independientemente de las variaciones de carga que reciban los módulos de ósmosis. Esa agua tratada podrá ser recuperada y reutilizada para diversos usos dentro del Complejo Medioambiental de gestión de Residuos (CMR)

I. Planta de compostaje.

El principal objetivo del compostaje de lodos es transformar unos materiales orgánicos en compost para su uso en agricultura y jardinería. El compostaje se desarrolla en varias etapas: Pretratamiento, maduración, fermentación y afino. (*41.000 t planta compostaje de Loeches en Madrid*)

- Pretratamiento: se realiza en una nave donde se trituran los restos vegetales y se mezclan con los lodos en una proporción de 1 a 3 (en volumen) pasando inmediatamente a los túneles de descomposición.
- Fermentación: cuenta con 18 túneles de ventilación forzada, donde los materiales pasan unos 14 días aproximadamente controlándose durante este tiempo la temperatura, humedad y aireación.
- Maduración: se realiza en unas naves abiertas que permiten la aireación y el control de la humedad, el proceso dura unas 10 semanas y su objetivo es conseguir una materia orgánica estable.
- Afino: Tras llevarse a cabo el afino que consiste en un cribado, el material está listo para su aplicación en agricultura o paisajismo.



Figura 26: Mezcla homogénea de lodos deshidratados con restos de poda.

Los lixiviados generados en los procesos son enviados para su tratamiento, el agua tratada se vuelve a utilizar en el proceso de compostaje y los lodos producidos vuelven a las tolvas de recepción de fangos para ser tratados en la planta de compostaje o secado térmico, de esta forma se cierra un ciclo en la planta de tratamiento evitando su vertido.

A partir de las 50.000 t m.h /año mezcladas ya con poda para compostaje, se estima que pueden obtenerse aproximadamente 14.900 toneladas de compost. El compost generado en esta planta fue registrado en 2011 en el Ministerio competente en materia de medio ambiente como producto fertilizante para ser comercializado con fines agrícolas, jardinería o recuperación paisajística.

II. Planta de secado térmico.

El lodo deshidratado llega a ambas plantas de Loeches y del secado Sur en camiones bañera (Figura 26) y por cinta (Figura 27) – en el caso de la Sur.



Figura 27: Camión bañera para transporte de lodos deshidratados.

Para la Sur, los lodos pasan a unas tolvas de almacenaje donde se bombea a los silos que alimentan ambas líneas.



Figura 28: Cinta transportadora y tolvas de almacenaje. EDAR sur.

En cuanto a la instalación de secado térmico, está compuesta por dos líneas de secado, con una capacidad de entrada de lodo en torno a las 300 t/día (105.000 t m.h./año) y esta diseñada para trabajar de forma continua 24 horas al día todos los días del año. Las 105.000 toneladas de lodo una vez secadas pasan a ser 25.000.

Con el secado térmico se consigue una considerable reducción del volumen de lodos procedentes del proceso de depuración de aguas residuales, lo que permite un ahorro en el transporte y distribución del biosólido, obteniendo un producto granulado, seco, sin malos olores, higienizado y de fácil utilización por los agricultores.

Existen varios sistemas de secado que pueden utilizarse para este fin, las plantas de secado térmico de Loeches y EDAR Sur utiliza un sistema de secado por convección indirecta de tambor giratorio, combinando varios sistemas de transferencia de calor. Se realiza un secado continuo en el que tanto el fango como el aire pasan continuamente a través del equipo, de forma indirecta, ya que el calor se obtiene independientemente del gas que se utiliza para secar y por convección, en el que la transferencia de calor se realiza fundamentalmente por la corriente de aire o fluido. Estos secadores tienen unas temperaturas de trabajo de 120 – 150 °C. (Conesa)

Los fangos deshidratados tienen un contenido en humedad del 65% y presentan una mezcla heterogénea en la que podemos distinguir:

- Agua libre del fango: es la más difícil de extraer (medios mecánicos)
- Agua capilar: Precisa temperatura para su extracción.
- Agua intracelular: Muy difícil de extraer.

Por ello, el secado debe producirse a alta temperatura. Estos secadores tienen como ventaja principal que el riesgo de incendio y explosión se reduce ya que la cantidad de oxígeno (aire) en el secadero es menor que el de un secador directo. (*Secado térmico*)

Durante el proceso de secado de lodos existe una zona de humedad, de aproximadamente el 50% en la que el fango se apelmaza y bloquea los sistemas de desplazamiento por el interior del secador. Esta fase se denomina “pastosa” y se ha de evitar de forma conveniente. Normalmente los sistemas optan por recurrir a la recirculación, es decir, adición de fango seco a la corriente de fango húmedo, a fin de que la humedad resultante sea inferior al 50%.



Figura 29: Secador mixto. tromel de secado de lodos y caldera de intercambiador de calor.

En general, el secado debería producirse inicialmente a temperatura baja, a fin de evaporar la humedad superficial, y luego seguir con una temperatura más elevada para eliminar el agua que exista en el interior de la estructura capilar.

Para el diseño del sistema de secado de lodos se han tenido en cuenta tanto las propiedades del sólido a secar como las del aire. Durante el secado, los sólidos pasan por tres etapas en cuanto a su velocidad de secado. En la primera, correspondiente más o menos con la cantidad de agua superficial, la velocidad de secado va aumentando a medida que disminuye la humedad, hasta que se llega a una zona de velocidad de secado constante, que corresponde a agua capilar. Finalmente, cuando el contenido de humedad

es realmente bajo se pasa a una zona de velocidad de secado decreciente, donde se elimina el agua intracelular. Los secaderos se diseñan en base a estos tres tramos de secado, en los que se determina el perfil de temperatura necesario para la humedad de diseño.

Gracias al proceso de secado térmico de los lodos, y para el que es necesario gas natural (quema de gas) mediante cogeneración, se pueden llegar a generar hasta unos 154.000 MWh de energía eléctrica al año, parte de la cual (en torno a un 14%) se utiliza para cubrir la demanda energética de la propia planta e instalaciones del Canal de Isabel II y otra parte se destina a una subestación de la planta de Loeches donde se vuelca o vierte en la red.

- Proceso de cogeneración de la EDAR.

El fomento de la cogeneración de alta eficiencia es una prioridad para la UE. La instalación de la cogeneración está diseñada para obtener de ella la energía térmica necesaria para el funcionamiento del secado térmico. Para ello está formado por 3 motores de gas natural con sus respectivas calderas de recuperación de calor y un circuito de aceite térmico que aportara la energía necesaria para llevar a cabo el secado térmico en dos unidades independientes.

Para la cogeneración se disponen en la planta de Loeches de 3 motores Roll Royce de 6,6 MW de electricidad compuestos por 16 cilindros que funcionan con gas natural, turbina de generación de energía eléctrica y calderas donde se intercambia calor.

Los motores disponen de unos grandes tubos RM a través de los que llega el gas natural. La cantidad de gas suministrada queda contabilizada gracias a un controlador. Los gases de combustión expulsado por los motores se dirigen a una caldera donde se intercambia calor. Ese calor se dirige a un circuito de aceite caliente que posteriormente se utiliza para secar los lodos.

Con la puesta en marcha de la Planta de compostaje y secado térmico de Loeches, que recibe alrededor del 25% de todos los lodos producidos por las instalaciones del Canal de Isabel II, ha aumentado el porcentaje dedicado a estos dos tratamientos considerablemente.

Mediante el proceso de secado térmico, que aprovecha el calor procedente de la cogeneración eléctrica, los lodos ven reducido su volumen, al pasar de una sequedad inicial del entorno del 21% a una final del 90%, consiguiendo un producto final en forma de gránulos de lodo seco, valorizable en agricultura o en combustible en algunos procesos industriales.

Aquellos lodos que resultan no aptos para la aplicación agrícola se destinan a vertedero o a valorización energética.

- EDAR de Butarque y EDAR Sur.

Respecto a la gestión de los lodos, hasta el 2019 gestionados por el Ayuntamiento de Madrid, y actualmente gestionados por Canal, se cuenta con dos plantas de secado térmico y cogeneración situadas junto a las EDAR de Butarque y a la EDAR Sur. Se presentan en la tabla 14 las principales características de ambas plantas.

Tabla 14: Plantas de secado térmico y cogeneración de antigua titularidad del Ayuntamiento de Madrid y ahora gestionadas por el Canal de Isabel II.

	EDAR Sur	EDAR. Butarque
Año entrada en servicio	2001	2003
Instalación de secado térmico		
Tipo de secado	Convección indirecta mediante tambor giratorio	Convección indirecta mediante tambor giratorio
Capacidad de secado (t m.h./año)	290.000	110.000
Capacidad de evaporación (kg/h)	27.000	10.300
Instalación de cogeneración		
Potencia instalada (MW) en la instalación	24,8	18

Los lodos tratados generados en las EDARs de antigua titularidad del Ayuntamiento de Madrid y actualmente gestionadas por Canal, han destinado su totalidad en agricultura, bien de forma directa o habiendo sido sometidos previamente al secado térmico. Como podemos ver en la tabla 11, durante el periodo 2006 – 2013 ha predominado el secado frente a la aplicación directa.

Tabla 15: Destino final de los lodos generados por las EDARs de titularidad del Ayuntamiento de Madrid y ahora gestionados por Canal.

Año	Secado térmico	Aplicación directa
2006	91%	9%
2007	83%	17%
2008	80%	20%
2009	74%	26%
2010	91%	9%
2011	92%	8%
2012	99%	1%
2013	98%	2%
2014	23%	77%
2015	0%	100%

La aplicación de lodos de depuradora tratados en terrenos agrícolas se realiza a través de empresas comercializadoras (con obligación de figurar registradas en el Registro de Aplicación de Lodos en Agricultura de la Comunidad de Madrid), que actúan como intermediarios entre los generadores de lodos y el propietario de los terrenos sobre los que se lleva a cabo la aplicación de los mismos.

Con fecha de septiembre de 2015, figuraban en el Registro de Aplicación de Lodos en Agricultura de la Comunidad de Madrid un total de 27 empresas comercializadoras.

La aplicación de lodos en agricultura está regulada por el Decreto 193/1998 y la Orden 2305/2014 de la Comunidad de Madrid que establecen las especificaciones en cuanto al porcentaje de humedad, contenido en metales pesados y dosis de aplicación por hectárea y año, así como, los controles y análisis a realizar sobre los lodos y los terrenos a los que se van a aplicar.

6. VALORACIÓN DE LOS POSIBLES EFECTOS AMBIENTALES DE LA APLICACIÓN DE LODOS EN LA AGRICULTURA.

Para poder realizar una valoración de los efectos medioambientales en la aplicación de lodos de depuradora de la Comunidad Autónoma de Madrid al suelo agrícola, se deben tener en cuenta los efectos de los siguientes parámetros presentes en la composición de estos lodos sobre el tipo de suelo al que se aplique:

Parámetros agronómicos:

- pH.
- Conductividad.
- Humedad.
- Materia orgánica total.
- Materia orgánica oxidable.
- Nitrógeno, P, Ca, Mg, K y Fe total.
- P, Ca, Mg, K y Fe asimilable.

Metales pesados:

- Cd, Cr, Ni, Hg, Pb, Zn y Cu.

Parámetros microbiológicos (microorganismos patógenos):

- Escherichia coli.
- Salmonella.

Microcontaminantes orgánicos:

- AOX.
- LAS.
- Ftalatos.
- Nonifenoles.
- PAH`s.
- PCB`s.
- Dioxinas y furanos.
- PBDE.

Dicho esto, voy a centrarme en los efectos ambientales que produce la aplicación de estos lodos a nivel de suelo, receptor de la mayoría de los lodos tratados y gestionados por el Canal de Isabel II en la CAM.

6.1. Efectos sobre las propiedades físicas del suelo

Los lodos como ya se ha comentado contienen un alto contenido en agua que afectará a distintos procesos y propiedades físicas del suelo, como la destrucción de macroagregados o cambios en la propia estructura del suelo. Para no producir problemas

por lixiviados en el suelo el grado de humedad de los lodos debe ser el adecuado, siendo valores normales al 75-85% de humedad. (Murcia,2014)

También se ha comentado que los lodos de depuradora, en este caso los gestionados por el Canal de Isabel II contienen una gran cantidad de materia orgánica, con independencia del tratamiento que se le aplique, este parámetro determinará la mayoría de los efectos producidos a nivel físico, produciendo cambios en la estructura y en el sistema poroso. (Cuevas y col., 2006).

Por otro lado, la aportación de estos lodos favorece el aumento de la estabilidad y formación de agregados, que a su vez contribuyen a la disminución de la erosión. Además, el aumento en el diámetro medio de agregados conlleva a favorecer movimientos de agua (conductividad hidráulica) y aire dentro de la matriz del suelo.

El aumento de macroporos como la formación de agregados en función del tiempo y espacio depende no solo de la incorporación de lodos sino también del método de labranza. (Marx y col. 1995)

También hay que destacar que existen diferencias dependiendo de la estructura del suelo, de tal forma que, poniendo un ejemplo, en suelos arenosos sería favorable aplicar lodos frescos ya que su pastosidad favorece la formación de agregados y en suelos francos sin problemas en la formación de agregados sería mejor aplicar un lodo secado térmicamente, reduciendo así la escorrentía superficial. (Ojeda,2006)

Por último, algunos expertos han observado efectos adversos en las propiedades físicas del suelo, la adición de cantidades excesivas de materia orgánica, o en suelos con un alto contenido en esta, se podrían llegar a producir fenómenos de hidrofobia y sellado superficial, menor capacidad de infiltración y aumento de la escorrentía superficial. (Macedo y col., 2002)

6.2. Efectos sobre las propiedades químicas del suelo.

Los lodos generados y destinados a aplicación a suelo agrícola en la CAM y gestionados por el Canal de Isabel II, pueden producir una serie de cambios en las propiedades químicas del suelo, como consecuencia de su composición en metales pesados, patógenos y contaminantes orgánicos. En este apartado se van a comentar las más destacables, como son la Capacidad de Intercambio Catiónico, pH, conductividad eléctrica y fertilidad del suelo.

- Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC)

En un estudio realizado por Canet y col. (1998) se añadieron lodos de depuradora de digestión anaerobia, además de otras enmiendas orgánicas durante 7 años en diferentes parcelas cultivadas con naranjos en la Comunidad Valenciana y se llegó a la conclusión de que a mayores dosis de lodos se produce un incremento de la CIC, y los cambios más pronunciados se producen en los primeros 20 cm de profundidad. El mismo autor se dio

cuenta de que abonando con estiércol no llegaba a los niveles de CIC del suelo de las parcelas con lodos de depuradora.

Cabe resaltar que los lodos de depuradora compostados tienen una CIC mayor que los lodos no compostados. Esto es debido a que la humificación de la materia orgánica que se produce durante el compostaje aumenta el grado de polimerización produciendo un aumento considerable de la superficie específica de las macromoléculas asociadas a la materia orgánica y un aumento de los grupos carboxílicos, principalmente y en menor medida de los grupos hidroxifenólicos. Por este motivo un lodo de depuradora compostado provoca una mayor rapidez en el aumento de la CIC que cualquier otro lodo con diferente tratamiento (Lax y col., 1986)

- pH

Por otro lado, tras la adición de los lodos el pH del suelo en cuestión no sufre ningún cambio significativo, exceptuando algún caso concreto. Las cantidades que se aplican de lodos no son tan grandes como para apreciar variaciones de este parámetro en el suelo. (Murcia, 2014). En cultivos en España de cítricos, olivares, lechugas y melonares entre otros así como parcelas agrícolas sin cultivos se han observado cambios, arriba o debajo del orden de 0,2 y 0,8 unidades, con diferentes dosificaciones y diferentes tipos de lodos en diferentes tipos de suelo. En estos estudios, los cambios más significativos de pH se dan lugar para los suelos con mayor degradación. (Giménez 2010; Abaunza 2014)

Los cambios en el pH del suelo dependerán del poder tampón del suelo (amortiguación del pH) y del pH de los lodos y las sustancias que presente el mismo. (Giménez,2010)

Cada tipo de suelo tiene una determinada capacidad de amortiguación, siendo de mayor a menor el siguiente orden: suelos húmicos, suelos arcillosos, suelos francos y suelos arenosos. La capacidad tampón es mayor al aumentar el contenido en arcillas y materia orgánica del suelo (Macías y col, 2005)

Como ya se ha comentado, a la hora de aplicar el lodo en un suelo es de vital importancia saber su composición, estudiar el suelo al que se va a aplicar y el tipo de cultivo presente para conocer sus necesidades. El pH del suelo determina la actividad y presencia de microorganismos, disponibilidad de nutrientes y desarrollo de los cultivos. (Giménez,2010)

Se han detectado especies vegetales que con el cambio de una unidad de pH se vería afectada la germinación de las semillas e incluso afectaría a la comunidad microbiana (Giménez, 2010)

- Conductividad eléctrica

Los lodos de depuradora tratados y gestionados a través del Canal de Isabel II en la CAM pueden presentar diferencias en las concentraciones de sus sales solubles. La conductividad eléctrica (CE) es el parámetro indirecto que mide su presencia en estos lodos. La concentración de sales depende del origen de las aguas residuales y de su acumulación en los lodos, siendo bastante menor la acumulación de estas sales en los lodos que en el suelo.

Existen muchos suelos con problemas de degradación y salinidad, por lo que este parámetro es importante a la hora de tenerlo en cuenta previamente a su aplicación al suelo. (Giménez,2010)

Existen estudios, (Beltrán y col, 2005), en los que se ha aplicado lodos de depuradora en 2 suelos de cultivo de olivares, un alfisol (Madrid) y un inceptisol (Toledo), comparándolos con suelos iguales no tratados con lodos (suelo control). Se aplicaron durante 4 años estos lodos con dosis de 16 t/ha y año y una CE entre 4,05 y 4,1 dS/m. Se comprobó que en ambos casos aumentaba la salinidad con respecto al suelo control o de referencia.

Sin embargo, otro estudio realizado en un campo de cultivo de cítricos de un suelo franco-arcilloso, al cabo de 8 años de aplicación de estos lodos se produjo una disminución de la salinidad del suelo en todas las muestras tomadas a diferentes profundidades con respecto al suelo de referencia.

Por este motivo, en algunos casos la aplicación de lodos en el suelo podría ayudar a la restauración de suelos salinos, con el estudio de cada caso con detenimiento. (Canet y col 1998)

Díaz y col (2010), estudiando el potencial de mitigación de los lodos en suelos con alto nivel de salinidad, observó que diferentes tipos de lodos mostraron resultados que mejoraron la permeabilidad de los suelos, recomendando su uso para suelos con problemas de sodicidad.

- Fertilidad del suelo.

El principal efecto de la aplicación de estos lodos en suelos agrícolas es el aumento de la materia orgánica. La fertilidad de los suelos es un concepto que está muy ligado al contenido de materia orgánica ya que, mejora las propiedades físicas de los suelos y al descomponerse libera nutrientes esenciales para las plantas. (Nadal 2016)

La composición de la materia orgánica de estos lodos puede ser muy diferente a la del humus del suelo, pudiendo cambiar su composición.

Otro efecto producido por la materia orgánica de los lodos EDAR de la CAM en el suelo es el incremento en la fijación del Carbono (C), pudiéndose incorporar a los

coloides minerales de los suelos. El Carbono (C) retenido adquiere más resistencia a la mineralización por microorganismos, factor positivo a la hora de evaluar la fertilidad del suelo.

Además, con la aplicación de estos lodos y su materia orgánica se aportan por consiguiente una serie de nutrientes al suelo (macronutrientes y micronutrientes). El Nitrógeno (N) y Fósforo (P) se aporta en su mayoría de forma orgánica y el resto de nutrientes de forma inorgánica. En cuanto a la disponibilidad de micronutrientes y elementos contaminantes para las plantas, como metales pesados, dependerá de las reacciones que sufran en el suelo. A consecuencia del aumento de la materia orgánica, nutrientes y elementos traza, el pH del suelo y la actividad microbiológica puede verse afectada. (Nadal,2016)

Desde el punto de vista nutricional, los lodos tratados generados en la CAM son una enmienda nutricional necesaria para los suelos con carencias nutricionales. Por este motivo los lodos se consideran fertilizantes orgánicos con una gran importancia debido a que muchos nutrientes se presentan a través de una asimilación lenta para las plantas. Por ejemplo, el N al presentarse en su mayoría de forma orgánica tendría pocas pérdidas por lixiviación o por volatilización a corto plazo. (Nadal,2016).

Los efectos contaminantes presentes en los lodos de depuradora (metales pesados y compuestos orgánicos tóxicos) y los excesos de nutrientes se estudiarán en apartados posteriores.

6.3. Efectos sobre las propiedades microbiológicas del suelo.

Existen algunos componentes tóxicos en los lodos como componentes orgánicos y metales pesados que pueden alterar las poblaciones naturales de microorganismos del suelo, disminuyendo la biomasa total y aumentando la presencia de organismos resistentes y tolerantes. (Nadal y Col., 2015)

Sin embargo, a pesar de que la resistencia de tóxicos puede disminuir la presencia y actividad microbiana, el balance de microorganismos y su actividad biológica total es mayor que la pérdida ocasionada por algún componente tóxico.

Los efectos de la aplicación de estos lodos sobre las propiedades microbiológicas del suelo, dependerá en gran medida de los factores del suelo. La disponibilidad de un metal para que sea asimilable para las plantas depende de las características del suelo, aunque también depende del metal en sí y del tipo de vegetación. Una planta absorbe los metales a través de la solución del suelo, por este motivo las propiedades del suelo condicionarán su concentración en solución y consecuentemente su biodisponibilidad. Algunas de las características del suelo que influyen son:

- Cantidad de materia orgánica
- pH del suelo.
- Textura.

- Temperatura y porosidad

Por otro lado, dependiendo de como se trate el lodo, su grado de higienización y la dosificación utilizada, se pueden añadir patógenos al suelo que pueden persistir hasta dos años, como en el caso de los coliformes. Estos patógenos suponen un riesgo si su presencia es suficiente como para llegar a tener contacto con animales y plantas. (Godim-Porto, 2013)

6.4. Riesgos ambientales de la utilización de lodos de depuradora en suelos.

En los puntos siguientes se van a analizar los principales riesgos derivados de la aplicación de lodos en agricultura, por la presencia de contaminantes químicos y biológicos y el posible riesgo para los seres humanos, animales, cultivos y contaminación de aguas.

- Riesgo por patógenos.

Los lodos de depuradora pueden contener gran cantidad de agentes patógenos. Su presencia está determinada por el origen de las aguas residuales y por el tratamiento realizado de lodos. Normalmente la estabilización de los lodos reduce considerablemente estos patógenos, aunque continúan presentes. El compostaje es el método más generalizado para la eliminación de patógenos, debido a su alto poder de higienización (Murcia 2014). Los principales tipos de patógenos que se pueden encontrar en los lodos de depuradora son:

- Virus de diferentes clases (Hepatitis, Adenovirus y Enterovirus). Son muy peligrosos pero su presencia es reducida. (Robert y Winkler, 1991)
- Bacterias pertenecientes a géneros *Salmonella*, *Shigella*, *Mycrobacterium*, *Vibrio*, *Pseudomona*, *Klebsiella*, *Escherichia*, *Clostridium*, *Brucella*, *Streptococcus*, *Yersinia*, *Listeria*, *Campylobacter* y *Bacillus*. (Robert y Winkler, 1991)
- Protozoos del género *Cryptosporidium*, *Eimeria* y *Toxoplasma*. (Burton y Turner, 2003)
- Hongos, relacionados con enfermedades radiculares de algunas especies vegetales como los del género *Fusarium*.
- Nematelmintos y platelmintos (Robert y Winkler, 1991)

Existen estudios que han verificado que los agentes patógenos se pueden transferir del lodo al suelo y permanecer en este durante un tiempo determinado. Estos estudios se han realizado analizando como marcadores bacterianos a coliformes y enterococos, y han determinado que los microorganismos patógenos pueden persistir durante periodos prolongados de tiempo en el suelo. En el caso de los coliformes fecales se ha observado que pueden permanecer en el suelo agrícola un año desde la adición de los lodos dependiendo de su dosificación e incluso llegando a dos años con dosis más elevadas (100 – 150 t/ha) (Godim- Porto, 2013). Por otro lado, en otros ensayos se han observado

periodos muchos mas cortos no superiores a 100 días con la presencia de coliformes realizando ensayos en laboratorio y en parcelas agrícolas (Estrada y col., 2004; García-Orenes y col., 2007)

La legislación en España no establece valores límite para la presencia de microorganismos patógenos o indicadores para los lodos de depuradora de uso agrícola, a diferencia de otros países como por ejemplo Estados Unidos y Francia (Nadal y col., 2015).

- Riesgo por resistencia a antibióticos.

La presencia de ciertas sustancias toxicas en lodos de depuradora como metales pesados, detergentes, pesticidas y productos farmacéuticos (inhibidores hormonales, antiinflamatorios o antibióticos) pueden afectar a las comunidades microbianas creando resistencias a antimicrobianos. La resistencia a antimicrobianos se adquiere cuando la cantidad necesaria de antimicrobianos para eliminar a un microorganismo aumenta respecto a la cantidad que era necesaria anteriormente, es decir, el microorganismo se vuelve más resistente a esa sustancia (Gondim-Porto, 2013).

Con respecto a las bacterias patógenas, es preocupante la resistencia a los antibióticos (antimicrobianos), debido a que las adquisiciones de estas resistencias hacen que sean más difíciles de eliminar, aumentando su persistencia en el medio (suelo, agua y vegetación) y aumentando su patogenicidad en humanos, animales y cultivos. La resistencia a antimicrobianos de bacterias se produce mediante mutaciones (al azar), o por procesos de transferencia horizontal de genes (transformación, transducción o conjugación). No obstante, hay que considerar que la resistencia a antibióticos también es un proceso natural presente en los suelos (Gondim-Porto, 2013; Nadal y col., 2015).

- Riesgos por excesos de nutrientes.

El rendimiento de los cultivos está estrechamente relacionado por el aporte equilibrado de los nutrientes esenciales para la vegetación, por lo que una falta o exceso de estos puede causar daños en las plantas (Giménez, 2010). En este caso el riesgo de intoxicación para los cultivos reside en el nitrógeno y fósforo que son los nutrientes más abundantes en los lodos de depuradora (Giménez, 2010).

El aporte elevado de nutrientes puede producir toxicidad en las plantas. Un alto aporte de nitrógeno puede producir un exceso de crecimiento de la parte vegetativa reduciendo el rendimiento del cultivo, como en el caso del tomate que puede producir un menor número de frutos cuajados. También, una alta concentración de nutrientes en el grano de cereales puede producir una alteración de su calidad.

- Riesgos por metales pesados.

Los metales pesados se acumulan en las plantas en las hojas, tallos, raíces y principalmente en los tejidos más viejos de la planta. Las semillas también acumulan metales pesados, aunque en menor proporción. Las plantas se introducen en la cadena

alimentaria de animales y humanos por lo que supone un problema para la salud. Por ello, en muchos países se establecen límites sobre la cantidad y dosificación de los lodos para su uso agrícola. (Murcia,2014)

Algunos metales pesados son esenciales para las plantas como el Zn, Cu, Mn y Fe, pero si se encuentran en niveles elevados resultan tóxicos al igual que otros metales pesados. La intoxicación de las plantas por estos metales tiene efectos nocivos en su metabolismo como son el cierre de los estomas y la inhibición de la transpiración, marchitamiento y turgencia, daños en los cloroplastos e inhibición de la fotosíntesis. Otros efectos inducidos son la clorosis y la disminución del crecimiento de las plantas. La tolerancia a los metales pesados varía mucho en función de cada especie. (Navarro – Aviño y col., 2007; Prieto y Col 2009)

El Cd y el Zn son considerados, junto con el Ni, los metales con mayor potencial contaminante para los suelos tratados con lodos, debido a su elevada movilidad y a su asimilabilidad para las plantas (Navarro- Aviño y col., 2007)

La disponibilidad de un metal para que sea asimilable para las plantas depende principalmente de factores del suelo, aunque también depende del metal en sí y del tipo de vegetación. Una planta absorbe los metales a través de la solución del suelo, en su forma iónica o compleja, por este motivo las características del suelo condicionaran su concentración en la solución y consecuentemente su biodisponibilidad (Micó, 2005)

- Riesgos por sustancias orgánicas tóxicas.

En los lodos existen gran cantidad de compuestos orgánicos tóxicos, aunque la mayoría se encuentra en pequeñas concentraciones. La variedad de contaminantes orgánicos se debe a la infinidad de productos usados cotidianamente que los contienen y a su origen industrial. Una de las principales preocupaciones de algunos de los compuestos orgánicos es su persistencia en los suelos.

Muchos de los compuestos orgánicos tóxicos son liposolubles y agravan su efecto con su baja biodegradabilidad, lo que produce la bioacumulación del contaminante en organismos y su posterior biomagnificación a través de la cadena trófica, pudiendo llegar animales y seres humanos. Algunos de estos compuestos son cancerígenos para los seres humanos e incluso actúan como disruptores endocrinos en animales y humanos.

Actualmente en España no existe ninguna legislación que regule su límite en lodos de depuradora, (Murcia, 2014)

7. DISPOSICIÓN FINAL. POSIBLES ALTERNATIVAS

El destino final para los lodos de depuradora de la Comunidad de Madrid que resulta más económico y viable, además de ser el que sigue más en línea con el principio de jerarquía de residuos que se propone en la vigente legislación en materia de gestión de residuos, y en la figura 3, es la aplicación de lodos tratados en suelos agrícolas.

Siempre que se respeten las dosis de aplicación y que se lleve una correcta coordinación entre los productores, comercializadores y propietarios agricultores, este tipo de gestión final de lodos supone su reutilización mediante incorporación como enmienda orgánica al terreno, sustituyendo o complementando la utilización de fertilizantes.

Las problemáticas que pueden darse en relación con este tipo de prácticas (malos olores, contaminación de masas de aguas subterráneas o del suelo), son inexistentes si la aplicación de lodos al terreno se lleva a cabo de forma correcta, teniendo en cuenta las exigencias legales vigentes y en los periodos y plazos adecuados.

Tras el análisis efectuado sobre la generación y gestión de los lodos de depuración de aguas residuales, y conforme al procedimiento habitual, se plantean una serie de alternativas que se consideran necesarias para mejorar la gestión de este tipo de residuos.

- ALTERNATIVA I: esta alternativa se basa en mantener el sistema actual y predecir como éste evolucionaría en el futuro en el caso de no aplicarse ninguna nueva medida
- ALTERNATIVA II: el sistema actual se vería modificado por nuevas medidas complementarias, para mejorar los objetivos propuestos en la normativa y planes de gestión de residuos.
- ALTERNATIVA III: implantación de un sistema de gestión de residuos que modifique de forma significativa la situación actual mediante la instalación de nuevos sistemas de tratamiento hasta ahora poco empleados.

Una vez se han propuesto las posibles alternativas, se enumeran y describen los aspectos fundamentales de cada una de ellas. (*Alternativas al plan de formulación y selección*)

La alternativa I mantiene el planteamiento actual en gestión de lodos que, se basa principalmente en los siguientes puntos:

- Adecuación del sistema de gestión a lo establecido en la normativa vigente, tanto estatal como autonómica.
- Existencia de circuitos comerciales para la aplicación agrícola de los lodos.

- Control y gestión correcta de la casi totalidad de lodos de depuración generados en la Comunidad de Madrid.
- Cumplimiento de los Objetivos cuantitativos establecidos en el Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos (PEMAR) en cuanto a los porcentajes de lodos de depuradora destinados a valorización de suelos e incineración o eliminación en vertedero.
- Capacidad potencial en las instalaciones de secado de lodos.
- Disponibilidad tanto de terrenos agrícolas como de parques en la Comunidad de Madrid para la valorización de los lodos.
- Destino adecuado para los lodos que por su contenido en metales no son aptos para su aplicación agrícola.

Esta alternativa cumple con los requisitos mínimos que establece la normativa, aunque algunos aspectos podrían ser objeto de mejora.

Debido a que no está previsto un aumento destacable en la generación de lodos de depuradora, el sistema actual de gestión sería suficiente, siempre que no se produjera una disminución de parcelas agrícolas donde depositar los lodos, motivada por la presión urbanística o medioambiental.

La alternativa II requiere algunas actuaciones de mejora sobre la situación actual o alternativa I, como pueden ser:

- Consolidación de objetivos establecidos en el PEMAR.
- Campañas para el fomento e implantación de sistemas de segregación de efluentes y pretratamientos de los vertidos, en especial de los procedentes de instalaciones industriales del sector agroalimentario. Control de estos últimos residuos, desarrollo e implantación de programas de investigación para la reducción de la contaminación de las aguas residuales y optimización de los tratamientos de depuración de los lodos generados en estas instalaciones.
- Operación de las Plantas de secado de lodos de depuración existentes, necesarias para tener capacidad suficiente de tratamiento, y mejora de la aplicación agrícola de los lodos, siguiendo la guía de buenas prácticas agrícolas.
- Construcción de instalaciones de almacenamiento intermedio para conseguir adecuar la producción de lodos con su aplicación en función de las necesidades agrícolas, teniendo en cuenta las fluctuaciones estacionales.
- Campañas de difusión entre agricultores de Manuales de Buenas Prácticas para la aplicación agrícola de lodos.
- Coordinación entre las entidades involucradas en la gestión de los lodos; productores de lodos (EDARs), empresas aplicadoras, propietarios de suelos agrícolas y gestores de residuos, para un adecuado seguimiento a través de aplicaciones informáticas, desde la generación de los lodos hasta su valorización o eliminación.

Esta alternativa lo que persigue es la optimización de la gestión actual mediante medidas de acompañamiento, para consolidar la valorización de lodos en agricultura.

La alternativa III supone un cambio notable en la gestión actual de los lodos de depuración y su aplicación se daría cuando existan problemas para disponer, total o parcialmente, de terrenos agrícolas para valorizar todos los lodos producidos, o bien los problemas de la proximidad de estos suelos con terrenos urbanos o zonas habitadas.

Esta alternativa supone la incineración o depósito a vertedero de cantidades de residuos superiores a los objetivos cuantitativos que se establecen en el PEMAR (15% para ambas operaciones)

Dicha posibilidad sería técnicamente viable si existieran suficientes instalaciones de incineración y depósito en vertedero en la Comunidad de Madrid (a parte de las actuales del Canal de Isabel II en Loeches). Por otro lado, el elevado coste de financiación y explotación además de los problemas medioambientales y de ubicación supondrían un problema.

Las actuaciones de fomento de la depuración, control de vertidos, programas de investigación sobre depuración y aplicación agrícola, campañas de difusión y la coordinación entre los distintos miembros implicados en la gestión, serían comunes en todas las alternativas.

- Alternativa seleccionada: Tras la evaluación de los posibles efectos medioambientales de la aplicación de estos lodos EDAR de la CAM en agricultura correspondiente a las tres alternativas, se ha considerado optar por la alternativa II.
- Algunos de los problemas actuales en aplicación de lodos, como las molestias por olores, se minimizarían con el adecuado funcionamiento, seguimiento y control de las instalaciones de secado de lodos y la implantación de almacenamientos temporales de lodos, contemplados en esta alternativa II.

8. CONCLUSIONES.

Los lodos de depuradora contienen importantes cantidades de materia orgánica y nutrientes que pueden servir para mejorar la fertilidad de los suelos. Por otra parte, pueden contar con una serie de componentes no deseados, como contaminantes emergentes que pueden quedarse en el suelo y lixiviar a las aguas subterráneas, entrando así en el ciclo del agua. Por ello es de vital importancia que exista un control para evitar que supongan un riesgo para el medio ambiente o la salud humana o animal. En definitiva se trata de un producto que con los debidos controles de composición y manejo puede resultar beneficioso para mejorar la fertilidad del suelo, sin ocasionar o minimizando los problemas medioambientales.

Existen periodos en los que no se puede realizar la aplicación de lodos por causas climatológicas (precipitaciones y temperaturas inadecuadas) o por condicionantes agrícolas. Una mala aplicación de los lodos en agricultura, por no tener en cuenta las necesidades hídricas del cultivo, las propiedades del suelo y las características del lodo pueden ocasionar graves problemas por riesgo de contaminación de las masas de agua subterránea o del suelo, así como malos olores.

Esta problemática puede minimizarse con el adecuado funcionamiento, seguimiento y control de las instalaciones de secado de lodos, la implantación de almacenamientos temporales y buenas prácticas agrarias en su aplicación.

Además, para una mayor protección del medioambiente se deberían advertir de los posibles efectos negativos de la aplicación de los lodos en agricultura y establecer nuevas guías de manejo junto con la creación a su vez de normativas más estrictas que vigilen la calidad de los lodos, no solo basándose en concentraciones de metales pesados, si no ampliando esa normativa a los demás componentes de los lodos, como la resistencia a los antibióticos, riesgos por la presencia patógenos, sustancias orgánicas tóxicas y otros.

9. BIBLIOGRAFÍA.

41.000 t planta compostaje de Loeches en Madrid. Recuperado 23 de febrero de 2023, de <https://www.aguasresiduales.info/revista/noticias/recicladas-41-000-toneladas-de-lodos-en-la-planta-de-compostaje-de-loeches-en-madrid-JCaIR>

311_443_plan_regional_lodos_depuradora_0.pdf. Recuperado 30 de enero de 2023, de https://www.comunidad.madrid/transparencia/sites/default/files/plan/document/311_443_plan_regional_lodos_depuradora_0.pdf

420.000 toneladas de agua residual en 2021—Canal de Isabel II. Recuperado 18 de enero de 2023, de https://www.canaldeisabelsegunda.es/detalles-noticia/-/asset_publisher/62PkTvFsR145/content/id/11165954?_com_liferay_asset_publisher_web_portlet_AssetPublisherPortlet_INSTANCE_62PkTvFsR145_languageId=es_ES

Aguas residuales a lo largo de la historia. Recuperado 18 de enero de 2023, de https://www.canaldeisabelsegunda.es/documents/20143/636803/Saneamiento_OK.pdf/66ffe4a2-95a1-cbe3-30c4-ece9ff28b5d3?t=1567680796525

Alternativas al plan de formulación y selección. Recuperado 18 de enero de 2023, de https://www.comunidad.madrid/transparencia/sites/default/files/plan/document/plan_gestion_lodos_depuracion_2017-2024.pdf

Bluegold. (2020, noviembre 19). *Tratamiento de lodos de depuración | Sistema convencional y MBR.* Blue Gold. <https://www.bluegold.es/el-tratamiento-de-lodos-de-depuracion-de-aguas-residuales/>

Caracterización y aceptación de los lodos. (2014, julio 28). Aguas Industriales. <http://aguasindustriales.es/tratamiento-de-lodos/>

Composición de lodos. (2023). En *Wikipedia, la enciclopedia libre.* https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Tratamiento_de_lodos&oldid=148815365

Composición general de los lodos de depuradora. Recuperado 18 de enero de 2023, de https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/publicaciones/lodos_depuradoras_tcm30-185077.pdf

Conesa, J. A. *Secado térmico de lodos de depuración.*

Destino final de lodos en España (INE). INE. Recuperado 18 de enero de 2023, de <https://www.ine.es/jaxi/Tabla.htm?path=/t26/p067/p01/serie/&file=01008.px>

Generación y gestión de lodos en la Comunidad Autónoma de Madrid. Recuperado 18 de enero de 2023, de https://www.comunidad.madrid/sites/default/files/doc/medio-ambiente/11_plan_de_gestion_de_lodos_de_depuracion_de_aguas_residuales.pdf

Gestión de lodos de depuradora—Conoce toda su normativa. (2019, febrero 19). *Eurofins Envira*. <https://envira.es/es/gestion-documental-de-lodos-de-depuradora/>

La deshidratación de fangos | Formación de ingenieros. Recuperado 24 de febrero de 2023, de <https://www.tecpa.es/la-deshidratacion-de-fangos/>

Las 4 etapas de las plantas de tratamiento de aguas residuales—IDRI

CA. (2022, agosto 3). <https://www.idrica.com/es/blog/plantas-de-tratamiento-de-aguas-residuales-etapas/>

Línea de fangos. Recuperado 24 de febrero de 2023, de <https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/saneamiento-depuracion/sistemas/edar/linea-fango/default.aspx>

Lodos de depuración de aguas residuales. Recuperado 18 de enero de 2023, de <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/prevencion-y-gestion-residuos/flujos/lodos-depuradora/>

Secado térmico. Recuperado 23 de febrero de 2023, de https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/3779/fichero/Capitulo_30.pdf

Tratamiento de lixiviados Loeches. Interempresas. Recuperado 1 de febrero de 2023, de [https://www.interempresas.net/Reciclaje/Articulos/461069-Complejo-Medioambiental-de-Reciclaje-\(CMR\)-de-Loeches-\(Madrid\).html](https://www.interempresas.net/Reciclaje/Articulos/461069-Complejo-Medioambiental-de-Reciclaje-(CMR)-de-Loeches-(Madrid).html)

Works, E. *El Canal gestionará y revalorizará los lodos generados en el 100 % de las EDAR de la Comunidad de Madrid*. Recuperado 30 de enero de 2023, de <https://www.aguasresiduales.info/revista/noticias/el-canal-gestionara-y-revalorizara-los-lodos-generados-en-el-100-de-las-edar-de-la-co-LYkKz>

Murcia, F. J. (2014). Lodos de depuradora: una visión integral para su posible aplicación a suelos desde una perspectiva agrícola. Tesis Doctoral. Universidad de Murcia.

Cuevas, J., Seguel, O., Ellies Sch, A., Dorner, J. (2006). Efectos de las enmiendas orgánicas sobre las propiedades físicas del suelo con especial referencias a la adición de lodos urbanos. *Revista de la Ciencia del Suelo y Nutrición Vegetal*, 6(2), 1-12.

Ojeda, G. (2006). Aplicaciones en superficie de lodos de depuradora y sus repercusiones sobre la erosión y las propiedades físicas del suelo. Tesis Doctoral. Universitat Autònoma de Barcelona.

Marx, D. H., Berry, C. R., Kormanik, P. P. (1995). Application of municipal sewage sludge in forest and degraded land. Agricultural utilization urban and industrial by-products. American Society of Agronomy Madison, Special Publication, N° 58.

Macedo, J. R., Pires, L. F., Reichardt, K., Dornelas, M., Bacchi, O. S. S., Menequelli, N. A. (2002). Organic residual management and soil physical properties. 17th World Congress of Soil Science. Bangkok (Thailand). 15-19, Agosto 2002.

Canet, R., Pomares, F., Estela, M., Tarazona, F. (1998). Efecto de diferentes enmiendas orgánicas en las propiedades del suelo de un huerto de cítricos. *Agrochemical*, XLIII, 41-49

Lax, A., Roig, A., Costa, F. (1986). A method for determining the cation-exchange capacity of organic materials. *Plant and Soil*, 94, 352-358.

Abaunza, G. A. (2014). Evaluación de riesgos derivados del uso de residuos orgánicos como enmiendas del suelo: Implicaciones en el comportamiento de herbicidas en el suelo. Trabajo fin de Máster. Universidad de Salamanca.

Giménez, P. J. (2010). Efectos sobre el sistema suelo-planta de compost de lodo anaerobio. Comparación con un fertilizante tradicional de la comarca de Cartagena. Proyecto final de Máster. Universidad Politécnica de Cartagena.

Macías, F., Lado, L. R., Arbestain, M. C., Barreal, E. (2005). Mecanismos de amortiguación de impactos acidificantes. Influencia de la litología, propiedades superficiales y grado de desarrollo edáfico. *Edafología*, 12(2), 117-124.

Canet, R., Pomares, F., Estela, M., Tarazona, F. (1998). Efecto de diferentes enmiendas orgánicas en las propiedades del suelo de un huerto de cítricos. *Agrochemical*, XLIII, 44-49.

Beltrán, E. M., Miralles de Imperial, R. M., Porcel, M. Á., Martín, J. V., Beringola, M. L., Calvo, R., del Mar Delgado, M. (2005). Influencia de la fertilización con lodos de depuradora compostados en las propiedades químicas del suelo de dos olivares. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 21(3), 145-159.

Nadal, I. (2016). Alteraciones fisiológicas, metabólicas y de la composición de las poblaciones bacterianas de la microbiota de un suelo agrícola tras la aplicación de residuos orgánicos urbanos. Tesis Doctoral. Universidad Complutense de Madrid.

Gondim-Porto, C. (2013). Análisis microbiológico de un suelo agrícola mediterráneo tras la aplicación de lodos de depuradora urbana. Tesis Doctoral. Universidad Complutense de Madrid.

Robert, L. J., Winkler, M. (1991). *Sludge parasites and other pathogens*. Water and Wastewater Technology, Ellis Horwood Series, New York, USA.

Navarro-Aviñó, J. P., Alonso, I. A., López-Moya, J. R. (2007). Aspectos bioquímicos y genéticos de la tolerancia y acumulación de metales pesados en plantas. *Revista Ecosistemas*, 16(2), 9-21.

Micó, C. (2005). Estudio de metales pesados en suelos agrícolas con cultivos hortícolas de la provincia de Alicante. Tesis Doctoral. Universidad de Valencia.