



Escuela Politécnica
Superior - Huesca
Universidad Zaragoza



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

EVOLUCIÓN DE CONTAMINANTES FÍSICO-QUÍMICOS Y MICROBIOLÓGICOS DURANTE EL PROCESO DE DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES URBANAS

Realizado por:
LUCÍA CISNEROS LAINEZ

Directora:
NATIVIDAD MIGUEL SALCEDO

Grado en Ciencias Ambientales

Junio 2015

Escuela Politécnica Superior de Huesca

Me gustaría dar las gracias...

A Nati, por darme la oportunidad de hacer este trabajo, por su disponibilidad total y su positividad.

A Andrea, por todo lo que me ha enseñado, por su paciencia y dedicación. Por su eterna sonrisa y ternura incluso en los días más largos.

Al grupo de laboratorio, por acogerme y ayudarme en todo lo que necesitaba, por la buena atmósfera que se respira.

A mis padres y a mi hermano, por el apoyo incondicional y sus consejos, pero sobre todo por su fe ciega en mí y en pensar que este día llegaría.

*A Daniel y a mis amigas, por estar siempre ahí.
¡Por darme ánimos y alegrías!*

MEMORIA

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.....	8
2. ANTECEDENTES	10
2.1. Aguas residuales urbanas	10
2.1.1. Características del agua bruta	12
2.1.2. Características del efluente	13
2.2. Legislación	14
2.2.1. Depuración de aguas residuales urbanas	14
2.2.2. Reutilización de aguas residuales urbanas	14
2.3. Depuración de aguas residuales urbanas	16
2.3.1. Autodepuración de los ríos.....	16
2.3.2. Características generales de una EDAR	17
2.3.2.1. Línea de aguas	18
2.3.2.1. Línea de fangos.....	23
2.3.3. Características de las EDAR objeto de estudio	24
2.3.3.1. EDAR A.....	24
2.3.3.2. EDAR B.....	26
2.3.3.3. EDAR C.....	27
2.4. Reutilización de aguas residuales urbanas	29
2.4.1. Justificación e importancia de la reutilización de aguas residuales urbanas	29
2.4.2. Historia de la reutilización de aguas residuales urbanas	30
2.4.3. Situación actual de la reutilización de aguas residuales urbanas en España	31
3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	33
3.1. Toma de muestras y conservación	33
3.1.1. Puntos de muestreo EDAR A	34
3.1.2. Puntos de muestreo EDAR B.....	35
3.1.3. Puntos de muestreo EDAR C.....	36
3.2. Metodología analítica.....	37
3.2.1 Parámetros físico-químicos	37
3.2.1 Parámetros microbiológicos.....	40
3.2.1.1. Análisis de Coliformes totales y Escherichia coli.....	40
3.2.1.2. Análisis de Enterococcus faecalis.....	44
3.2.1.3. Análisis de Huevos de nemátodos	46
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	49

4.1. EDAR A	49
4.2. EDAR B.....	54
4.3. EDAR C.....	58
4.4. Influencia de las etapas de depuración en la evolución de los contaminantes.	63
4.5. Reutilización de los efluentes de las EDAR objeto de estudio	68
5. CONCLUSIONES	75
6. BIBLIOGRAFÍA.....	78
7. ANEXOS	84
ANEXO I. DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA ANALÍTICA DE LOS PARÁMETROS FÍSICO- QUÍMICA	84
I.I. pH.....	84
I.II. Conductividad y temperatura.....	84
I.III. Oxígeno disuelto.....	84
I.IV. Turbidez	84
I.V. DQO.....	85
I.VI. COD	86
I.VII. Fósforo total.....	86
I.VIII. Nitritos	87
I.IX. Nitratos.....	87
I.X. Nitrógeno amoniacal	87
I.XI. Sólidos en suspensión	88
I.XII. Sólidos en suspensión volátiles	88
I.XIII. Sólidos totales	89
ANEXO II. RESULTADOS	90
II.I. RESULTADOS DEL ANÁLISIS FÍSICO QUÍMICO Y MICROBIOLÓGICO DE LA EDAR A	91
II.II. RESULTADOS DEL ANÁLISIS FÍSICO QUÍMICO Y MICROBIOLÓGICO DE LA EDAR B	92
II.II. RESULTADOS DEL ANÁLISIS FÍSICO QUÍMICO Y MICROBIOLÓGICO DE LA EDAR C	93

ÍNDICE DE TABLAS Y FIGURAS

• Tablas

Tabla 1. Contaminantes relevantes en el tratamiento de aguas residuales urbanas.....	10
Tabla 2. Resultados de la caracterización de un agua residual urbana	12
Tabla 3. Resultados de la caracterización del agua de salida de una EDAR.....	14
Tabla 4. Límites exigidos por el RD 1620/2007 para la reutilización de aguas residuales urbanas	15
Tabla 5. Características del agua residual urbana de la EDAR A	24
Tabla 6. Características del agua de salida y rendimientos de la EDAR B.....	26
Tabla 7. Características del agua residual EDAR B.....	26
Tabla 8. Características del agua de salida y rendimientos de la EDAR B.....	27
Tabla 9. Características el agua residual EDAR C.....	28
Tabla 10. Características del agua de salida y rendimientos de la EDAR C.....	29
Tabla 11. Modelo de ficha utilizada en cada muestreo	33
Tabla 12. Descripción de los puntos de muestreo de la línea de aguas, EDAR A.....	34
Tabla 13. Descripción de los puntos e muestreo de la línea de aguas, EDAR B.....	35
Tabla 14. Descripción de los puntos de muestreo de la línea de aguas, EDAR C.....	36
Tabla 15. Metodología analítica de parámetros físico-químicos.....	39
Tabla 16. Composición del medio de cultivo Slanetz & Bartley	45
Tabla 17. Metodología analítica de parámetros microbiológicos	48
Tabla 18. Efluentes EDAR objeto de estudio.....	68
Tabla 19. Aspectos positivos y negativos de los lechos de arena y la tecnología de membranas.....	71
Tabla 20. Porcentajes de reducción obtenidos tras un tratamiento de filtros de arena y un sistema de membranas.....	72
Tabla 21. Aspectos positivos y negativos de los sistemas de desinfección	73
Tabla 22. Porcentajes de reducción obtenidos tras la desinfección.....	74
Tabla 23. Resultados del análisis físico-químico de la EDAR A	91
Tabla 24. Resultados del análisis microbiológico de la EDAR A.....	91
Tabla 25. Resultados del análisis físico-químico de la EDAR B	92
Tabla 26. Resultados del análisis microbiológico de la EDAR B.....	92
Tabla 27. Resultados del análisis físico-químico de la EDAR C	93
Tabla 28. Resultados del análisis microbiológico de la EDAR C.....	93

• Figuras

Figura 1. Esquema del mecanismo de autodepuración de los ríos.	16
Figura 2. Esquema del sistema integral hidráulico-sanitario.	17
Figura 3. Diagrama de bloques de la línea de aguas de una EDAR	18
Figura 4. Diagrama y foto real del tratamiento de fangos activados.....	20
Figura 5. Diagrama del proceso de lechos bacterianos.....	21
Figura 6. Foto real del proceso de lechos bacterianos.	21
Figura 7. Foto real del proceso de lagunaje natural	22
Figura 8. Diagrama de bloques de la línea de fangos de una EDAR	23
Figura 9. Etapas de una EDAR biológica.....	24
Figura 10. Dibujo esquemático y vista real de la EDAR A.....	25
Figura 11. Dibujo esquemático y vista real de la EDAR B.....	27
Figura 12. Dibujo esquemático y vista real de la EDAR C.....	28
Figura 13. Usos a los que se destinan las aguas regeneradas de España.....	31

Figura 14. Esquema de un sistema de reutilización de aguas residuales urbanas.	31
Figura 15. Distribución del número de sistema de reutilización (322).	32
Figura 16: Volumen de agua reutilizada por Comunidades Autónomas.....	32
Figura 17. Localización de los puntos de muestreo en la EDAR A.....	35
Figura 18. Localización de los puntos de muestreo en la EDAR B.....	36
Figura 19. Localización de los puntos de muestreo de la EDAR C.	37
Figura 20. Esquema del método de diluciones seriadas.	42
Figura 21. Aspecto de las placas Petri después de la siembra en superficie de la diluciones decimales de una muestra de agua (de la más concentrada 0 a la más diluida -3).	42
Figura 22. Colonias de Coliformes totales y Echerichia coli de la Muestra 2, EDAR B.	44
Figura 23. Colonias de Enterococcus faecalis de la Muestra 7, EDAR A.....	46
Figura 24.Huevos de nematodos vistos por microscopio	47
Figura 25. Evolución de los parámetros medidos in situ de la EDAR A	49
Figura 26. Evolución de la materia orgánica de la EDAR A	50
Figura 27. Evolución de los sólidos en suspensión y la turbidez de la EDAR A	51
Figura 28. Evolución de los nutrientes analizados de la EDAR A	52
Figura 29. Evolución de los parámetros microbiológicos analizados de la EDAR A.....	53
Figura 30. Evolución de los parámetros medidos in situ de la EDAR B	54
Figura 31. Evolución de la materia orgánica de la EDAR B.....	55
Figura 32. Evolución de los sólidos en suspensión y la turbidez de la EDAR B.....	55
Figura 33. Evolución de los nutrientes analizados de la EDAR B.....	56
Figura 34. Evolución de los parámetros microbiológicos analizados de la EDAR B.....	57
Figura 35. Evolución de los parámetros medidos in situ de la EDAR C	58
Figura 36. Evolución de la materia orgánica de la EDAR C.....	59
Figura 37. Evolución de los sólidos en suspensión y la turbidez de la EDAR C.....	60
Figura 38. Evolución de los nutrientes analizados de la EDAR C.....	61
Figura 39. Evolución de los parámetros microbiológicos analizados de la EDAR C.....	62
Figura 40. Porcentajes de reducción de los parámetros analizados a lo largo de la línea de tratamiento de la EDAR A	64
Figura 41. Porcentajes de reducción de los parámetros analizados a lo largo de la línea de tratamiento de la EDAR B.....	65
Figura 42. Porcentajes de reducción de los parámetros analizados a lo largo de la línea de tratamiento de la EDAR C.....	66
Figura 43. Proceso de filtración (lecho de arena).....	70
Figura 44. Funcionamiento de un sistema de membrana	71
Figura 45. Turbidímetro HANNA LP 2000	85
Figura 46. Fotómetro multiparamétrico HANNA 83099 y reactor HANNA 839800	85
Figura 47. Analizador de Carbono Orgánico Total SHIMADZU, modelo TOC-Vcsh.....	86
Figura 48. Analizador de Nitrógeno Amoniacal CRISON, modelo GL22	87

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

El vertido de aguas residuales sin depurar ocasiona daños al medio ambiente y a la salud pública. Por ello es necesario someter dichas aguas a un proceso de depuración, es decir, a una serie de procesos físicos, químicos y biológicos con el fin de reducir al máximo su nocividad.

Pero a pesar del tratamiento y la consecuente eliminación de gran parte de los contaminantes, el efluente depurado todavía contiene gran variedad de ellos, entre los que se encuentra materia orgánica, sólidos, nutrientes y microorganismos patógenos como la *Escherichia coli*, responsables de ocasionar una influencia negativa sobre el medio ambiente. De tal manera es así, que el RD 508/2007, por el que se regula el suministro de información sobre emisiones en el Registro Estatal de Emisiones y Fuentes Contaminantes, ya considera a las Estaciones de Depuración de Aguas Residuales (EDAR) como una fuente de emisiones contaminantes. Este hecho es de especial interés cuando un agua depurada va a ser objeto de regeneración, ya que su calidad va a determinar el tipo de tratamiento al que ha de ser sometida según el uso al que vaya a ser destinada. Puede reutilizarse con distintos fines, especialmente como aguas de riego para la agricultura, pero también para usos urbanos, industriales, recreativos o medioambientales. Todos los posibles usos están recogidos en el anexo I del RD 1620/2007, donde quedan establecidos los criterios mínimos de calidad atendiendo a diferentes parámetros microbiológicos y físico-químicos.

Cabe destacar que el diseño de las EDAR urbanas se rige en función de los límites de vertido fijados por la legislación, de modo que las técnicas utilizadas están enfocadas principalmente a minimizar aquellos parámetros a los que la normativa hace referencia. En nuestro caso los marca la Directiva 91/271/CEE, encargada de regular el vertido de las aguas residuales urbanas a los cauces naturales, donde solamente se establecen límites para la demanda biológica de oxígeno (DBO₅, 25 mg/L O₂), la demanda química de oxígeno (DQO, 125 mg/L O₂), los sólidos en suspensión (SS, 35 mg/L) y en algunos casos para nitrógeno (15 mg/L N) y fósforo (2 mg/L P) si se trata de zonas vulnerables.

Por otra parte, recalcar que realmente es en las Estaciones de Regeneración de Aguas Residuales (ERAR) donde se llevan a cabo los tratamientos adicionales destinados a regenerar las aguas procedentes de los efluentes de las EDAR. La finalidad reside en obtener caudales susceptibles a reutilización, evitando así el consumo de agua potable para usos en los que no se requiere un agua de una calidad tan elevada. Entre otras cosas, dichas instalaciones son las encargadas de eliminar los agentes patógenos presentes hasta niveles que no supongan un riesgo para la salud de las personas ni para el medio ambiente.

A pesar de que todas las EDAR urbanas cuentan con las instalaciones necesarias para llevar a cabo la disminución de los parámetros necesarios hasta los límites establecidos en la legislación vigente, las tecnologías empleadas varían. Por ello, el objetivo principal de este trabajo reside en realizar un estudio de la evolución de una serie de contaminantes a lo largo de la línea de tratamiento de diferentes EDAR pertenecientes a la cuenca del Ebro con el fin de observar las características que tiene el agua una vez finalizado su tratamiento.

Para llevarlo a cabo es necesario desarrollar una serie de objetivos específicos:

- Caracterizar el agua de cada una de las etapas de la línea de tratamiento de las EDAR objeto de estudio de forma físico-química.

- Caracterizar el agua de cada una de las etapas de la línea de tratamiento de las EDAR objeto de estudio de forma microbiológica.

- Estudiar la variación de los parámetros analizados en función de las diferentes etapas de tratamientos de las distintas EDAR.

- Estudiar la posible reutilización de aguas depuradas objeto de estudio.

La memoria se estructura de la siguiente manera:

1. Introducción y objetivos
2. Antecedentes
3. Materiales y métodos
4. Resultados y discusión
5. Conclusiones
6. Bibliografía
7. Anexos

Tras el presente apartado de “Introducción y objetivos”, se presenta en el segundo los “Antecedentes”, donde se contextualiza el Trabajo Fin de Grado. Se tratan aspectos generales referentes a las aguas residuales urbanas, a los sistemas de depuración más comunes haciendo hincapié en aquellos utilizados en las instalaciones a estudiar, además de los posibles usos del agua tratada en caso de reutilización y la legislación vigente referente a todo ello.

En el apartado “Materiales y métodos”, se describen los instrumentos y procedimientos utilizados para la toma de muestras y su posterior caracterización físico-química y microbiológica.

A continuación, en “Resultados y discusión”, quedan recogidos los valores obtenidos del análisis de las muestras. Además se realiza un estudio comparativo acerca de cómo afectan los diferentes tratamientos de depuración a los contaminantes presentes en el agua residual urbana, con el fin de analizar la posibilidad de reutilizar el efluente de las EDAR atendiendo a la legislación vigente y proponiendo posibles tratamientos adicionales. Por último, las conclusiones exponen de forma clara y concisa los resultados obtenidos tras realizar un estudio de las caracterizaciones resultantes del análisis de las muestras.

Además, la memoria se complementa con dos anexos. Uno recoge los datos de los parámetros analizados de cada una de las muestras tomadas en las EDAR residuales objeto de estudio y otro con el desarrollo de la metodología analítica físico-química.

El presente Trabajo Fin de de Grado se ha realizado en el Grupo de Investigación de “Calidad y Tratamiento de Aguas” perteneciente al Departamento de Ingeniería Química y Tecnologías del Medio Ambiente de la Universidad de Zaragoza y al Instituto Universitario de Ciencia Ambientales de Aragón (IUCA).

2. ANTECEDENTES

2.1. Aguas residuales urbanas

Aguas residuales urbanas son las aguas recogidas en las aglomeraciones urbanas, procedentes de los vertidos de la actividad humana doméstica o la mezcla de éstas con las procedentes de actividades comerciales, industriales y agrarias integradas en el núcleo urbano, así como las aguas de lluvia.

La composición de dichos caudales es muy variable. Depende de factores como el propio consumo de agua, actividades industriales, régimen alimenticio y costumbres de la población, del tipo de sistemas de recogida que se emplee, etc.

En la Tabla 1 se describen una serie de contaminantes presentes en dichos caudales y que resultan de interés a la hora de llevar a cabo el tratamiento de un agua residual (Metcalf and Eddy, 1995).

Tabla 1. Contaminantes relevantes en el tratamiento de aguas residuales urbanas

CONTAMINANTES	RAZÓN DE LA IMPORTANCIA
SÓLIDOS EN SUSPENSIÓN	Pueden dar lugar al desarrollo de depósitos de fango y de condiciones anaerobias cuando se vierte agua residual sin tratar al entorno acuático.
MATERIA ORGÁNICA BIODEGRADABLE	Se mide en función de la DBO (demanda bioquímica de oxígeno) y de la DQO (demanda química de oxígeno). Si se descargan al entorno sin tratar su estabilización biológica puede llevar al agotamiento de los recursos naturales de oxígeno y al desarrollo de condiciones sépticas.
PATÓGENOS	Pueden transmitir enfermedades contagiosas.
NUTRIENTES	Cuando se vierten al entorno acuático pueden favorecer al crecimiento de una vida acuática no deseada. Cuando se vierten al terreno en cantidades excesivas, también puede provocar contaminación del agua subterránea.
CONTAMINANTES PRIORITARIOS/ MATERIA ORGÁNICA REFRACTARIA	Son compuestos orgánicos e inorgánicos determinados en base a su capacidad para producir cáncer, mutaciones o toxicidad. Además, son capaces de resistir los métodos convencionales de tratamiento. Un ejemplo son los pesticidas agrícolas o los agentes tensoactivos.
METALES PESADOS	Suelen ser añadidos al agua residual en el curso de ciertas actividades comerciales e industriales, y es necesario eliminarlos si se pretende reutilizar el agua.
SÓLIDOS INORGÁNICOS DISUELTOS	Calcio, sodio, sulfatos...añadidos al suministro del agua como consecuencia de su uso. Deben ser eliminados para una posible reutilización.

A continuación se describen y comentan los parámetros específicos más importantes de las aguas residuales urbanas que se utilizan a la hora de diseñar y comprobar la eficacia de una EDAR (Trapote, 2011), ambos aspectos importantes de cara al cumplimiento de la normativa vigente.

· Temperatura: condiciona los procesos de depuración biológica (degradación de la materia orgánica), por lo que es importante su control. A medida que desciende la temperatura se ralentizan dichos procesos.

· pH: Si las aguas residuales urbanas no contienen vertidos industriales, su pH oscila entre 6,5 y 8,5, valores que no plantean problemas a los procesos de depuración. Fuera de este rango se producen problemas en los procesos biológicos, de ahí la importancia de llevar a cabo un control por si fuera necesario llevar a cabo una corrección del pH.

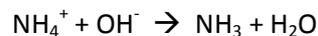
· Sólidos en Suspensión (SS): define la cantidad de fangos que será preciso eliminar en la EDAR. La proporción en los fangos entre sólidos fijos y volátiles, o lo que es lo mismo, entre sólidos inorgánicos y orgánicos, determina la posibilidad de funcionamiento del procesos de estabilización para su tratamiento.

· Materia Orgánica (MO): su contenido en las aguas residuales expresa su capacidad de absorción del oxígeno disuelto que contienen las aguas de los cauces naturales, según la reacción:



Para valorar la materia orgánica se utilizan diversos parámetros, principalmente la DBO y la DQO: la Demanda Bioquímica de Oxígeno refleja la materia orgánica biodegradable que existe en el agua residual, indicando el oxígeno necesario para alimentar a microorganismos aerobios y las reacciones químicas del metabolismo microbiano. Por otro lado, la Demanda Química de Oxígeno es la cantidad de oxígeno consumida por los cuerpos reductores presentes en al agua residual, sin intervención de organismos vivos. Es decir, ambas oxidan la materia orgánica fijando el oxígeno, la diferencia reside en que la primera lo realiza por intermedio de las bacterias, y la segunda por vía química.

· Nitrógeno amoniacal: expresa el contenido de nitrógeno en forma de ión amonio. En función de la temperatura y el pH, se tiene la siguiente reacción química entre el amonio y amoníaco:



· Fósforo: presente en las aguas residuales en forma de ortofosfatos (PO_4^{-3}) o polifosfatos (P_2O_7). Actúa como nutriente siendo un factor importante de la eutrofización.

De todos los parámetros, los básicos para observar el correcto funcionamiento de una EDAR urbana son la DQO y los SS. Sin embargo, existen otros parámetros que deben situarse dentro de ciertos límites para conseguir que el proceso de depuración biológica se desarrolle adecuadamente (Trapote, 2011). Alguno de estos factores a tener en cuenta son:

· La presencia de H_2S es un índice de insuficiencia de oxígeno disuelto, lo que provoca una mala sedimentabilidad de los fangos biológicos, con la aparición de organismos filamentosos y problemas de corrosión.

· Son necesarias ciertas concentraciones de metales como el calcio, cobalto, cobre, hierro, magnesio, manganeso y zinc. Dichos metales se encuentran en forma natural en la corteza terrestre, el problema reside en que se convierten en contaminantes cuando su

distribución en el ambiente se altera mediante actividades humanas. Por ello, a pesar de estar catalogados como sustancias contaminantes, algunos de ellos son imprescindibles para el normal desarrollo de la vida biológica, y la ausencia de cantidades suficientes de ellos podría limitar, por ejemplo, el crecimiento de las algas (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), 2009).

· Los sulfatos deben limitarse si la digestión de fangos es anaerobia con el fin de evitar la producción de sulfhídrico, indeseable en la instalación por su poder corrosivo.

Una vez conocidos los parámetros más relevantes presentes en las aguas residuales urbanas, se va a desarrollar las características generales que tiene el agua tanto a la entrada como a la salida de una EDAR.

2.1.1. Características del agua bruta

Como se ha nombrado en el apartado anterior, el agua de entrada a las EDAR depende de una serie de factores que condicionan su composición. Además, dicha composición será modificada a largo de la línea de tratamiento de las EDAR con el fin de reducir la concentración de los contaminantes presentes hasta los límites establecidos por la legislación.

El conjunto de parámetros utilizados para realizar la caracterización físico-química y microbiológica del agua de entrada y llevar así un control de las etapas de las EDAR, se muestran en la Tabla 2. También se indica el origen más probable de cada uno de ellos además de la concentración típica con tres posibles grados de contaminación (Metcalf and Eddy, 1995).

Tabla 2. Resultados de la caracterización de un agua residual urbana

PARÁMETROS			ORIGEN	CONCENTRACIÓN (mg/L)		
				FUERTE	MEDIA	DÉBIL
Sólidos	Sólidos en Suspensión		Abastecimientos, residuos domésticos e industriales	350	200	100
	Sólidos en Suspensión Volátiles			275	150	70
	Sólidos Totales			1200	700	350
DQO			Residuos domésticos	1000	500	250
Carbono Orgánico Total			Residuos domésticos	290	160	80
Fósforo			Residuos industriales y domésticos	15	8	4
Nitrógeno total	Nitrógeno-Kjeldahl	Nitrógeno orgánico	Residuos agrícolas y domésticos	35	15	8
		Nitrógeno amoniacal		50	25	12
	Nitritos NO ₂ ⁻			0	0	0
	Nitratos NO ₃ ⁻			0	0	0

2.1.2. Características del efluente

A pesar de la disminución y eliminación de gran parte de los contaminantes y microorganismos presentes en un agua residual urbana tras el proceso de depuración, el agua que sale de una EDAR todavía contiene gran variedad de agentes patógenos (virus, bacterias y protozoos), materia orgánica, sólidos en suspensión y sustancias inorgánicas (Mosteo et al., 2013).

La composición de dichos efluentes depende fundamentalmente de los aportes industriales al vertido urbano y del tipo de tratamiento al que han sido sometidas. A pesar de ello, se puede decir que en general, estas aguas se caracterizan por (Katsoyiannis y Samara, 2006; Kuster et al., 2008):

- La presencia de altas concentraciones de sólidos en suspensión, lo que implica, entre otras cosas, una elevada turbidez.

- La presencia de gran variedad de gérmenes patógenos. Es el factor de riesgo más importante asociado a la reutilización del agua. Supone la exposición del hombre a agentes biológicos como son bacterias patógenas, helmintos, protozoos o virus entéricos.

- La presencia de contaminantes inorgánicos, como cloruros, nitrógeno y fósforo (en concentración variable según proceda de instalaciones con o sin eliminación de nutrientes) y en algunos casos de metales pesados, no eliminados en el tratamiento de depuración y cuya concentración depende en gran medida de la componente industrial que tenga el vertido urbano.

- La presencia de materia orgánica. Dentro de este grupo genérico, se distingue:

- Materia orgánica No Peligrosa: Formada mayoritariamente por compuestos que no han sido degradados en las instalaciones de depuración, bien porque son refractarios al tratamiento o bien porque no se han alcanzado rendimientos del 100%. Se trata de sustancias orgánicas como los ácidos carboxílicos, proteínas, hidratos de carbono, aminoácidos, etc.

- Materia orgánica Peligrosa: sustancias persistentes que no han sido eliminadas en el tratamiento de depuración y pueden resultar un problema tanto ambiental como sanitario. Se trata de productos farmacéuticos, productos de limpieza y cuidado personal, detergentes, plaguicidas... algunos de ellos con características tóxicas, cancerígenas, mutagénicas o bioacumulables. Muchos forman parte de un gran y diverso grupo de compuestos orgánicos, denominado contaminantes emergentes o prioritarios, los cuales están recibiendo gran atención en los últimos años (Hernando et al., 2006).

En la Tabla 3 quedan recogidos los valores de algunos parámetros físico-químicos y microbiológicos que presenta el agua a la salida de una EDAR (Mosteo et al., 2013):

Tabla 3. Resultados de la caracterización del agua de salida de una EDAR

PARÁMETRO	VALOR	PARÁMETRO	VALOR
pH	7,22 – 8,61	Coliformes totales	$10^4 - 2 \cdot 10^6$ UFC/100ml
CONDUCTIVIDAD	832 – 3220 μ S/cm	<i>Escherichia coli</i>	$6,0 \cdot 10^2 - 7,3 \cdot 10^6$ UFC/100mL
TURBIDEZ	1,7 – 34,7 UNT	<i>Enterococcus faecalis</i>	$1,2 \cdot 10^1 - 3,2 \cdot 10^5$ UFC/100mL
SS	4 – 56 mg/L	Huevos de nematodos	> 1 huevo/10 L
DQO	50 – 112 mg/L O ₂		
COT	9,0 – 27,4 mg/L C		
N TOTAL	7,90 – 45 mg/L		
NO ₂ ⁻	0,05 – 0,14 mg/L		
NO ₃ ⁻	5,50 – 10,98 mg/L		
NH ₄ ⁺	1,8 – 37,7 mg/L NH ₄ ⁺		
P TOTAL	0,02 – 10,76 mg/L		

2.2. Legislación

2.2.1. Depuración de aguas residuales urbanas

El desarrollo de este trabajo está basado en la Directiva 91/271/CEE, encargada de definir los sistemas de recogida, tratamiento y vertido de las aguas residuales urbanas.

En dicha normativa quedan establecidas las eficiencias mínimas exigibles de los tratamientos llevados a cabo en las EDAR, así como los requisitos para los vertidos procedentes de dichas instalaciones. Los parámetros regulados son los siguientes: la demanda biológica de oxígeno (DBO₅, 25 mg/L O₂), la demanda química de oxígeno (DQO, 125 mg/L O₂), los sólidos en suspensión (SS, 35 mg/L) y en algunos casos para nitrógeno (15 mg/L N) y fósforo (2 mg/L P) si se trata de zonas vulnerables.

Por lo tanto, la legislación española no ha especificado los valores límite de muchos parámetros y como consecuencia, el cumplimiento de la legislación vigente no garantiza que el agua residual tratada esté exenta de contener características sanitarias que puedan al cabo del tiempo puedan desencadenar tanto la degradación ambiental como un riesgo para la salud.

2.2.2. Reutilización de aguas residuales urbanas

La posible presencia de ciertas sustancias en aguas depuradas que no han sido eliminadas durante el tratamiento cobra más relevancia si se tiene presente el concepto de regeneración y reutilización de aguas residuales urbanas. Las primeras actuaciones legales en cuanto a la regeneración y posterior reutilización del agua en España se realizaron adoptando las normas de reutilización de California (California Code Regulations, 2001), las directrices de la US EPA (U.S. Environmental Protection Agency, 2004) y las recomendaciones de la OMS (Organización Mundial de la Salud, 1989). En 1999, el Ministerio de Obras Públicas, Transporte y Medio Ambiente propuso un conjunto de propiedades fisicoquímicas y microbiológicas para 14 posibles aplicaciones de agua regenerada (Jordán, 2008).

Actualmente, para que el agua de salida de depuradora pueda reutilizarse ha de cumplir unos criterios de calidad en función del uso al que se destine, tal y como figura en el Real Decreto 1620/2007, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas. En él quedan definidos el concepto de reutilización y agua regenerada además de quedar reguladas todas aquellas cuestiones relacionadas, como son los límites de parámetros específicos que deben cumplirse en función del uso al que vaya a ser destinada el agua regenerada; dichos criterios serán considerados mínimos obligatorios exigibles.

En España, el RD 1620/2007 fija límites máximos de turbidez, sólidos en suspensión, nematodos intestinales y *Escherichia coli*, entre otros, e impone que en los casos que haya presentes sustancias peligrosas deberá asegurarse el respeto de las Normas de Calidad Ambiental (NCAs) correspondientes (WHO, 2006).

En la Tabla 4 se detallan los límites máximos regulados para cada parámetro en función de uso del agua previsto:

Tabla 4. Límites exigidos por el RD 1620/2007 para la reutilización de aguas residuales urbanas

USO DEL AGUA PREVISTO	Nematodos intestinales (huevos/10L)	SS (mg/L)	TURBIDEZ (NTU)	<i>E.coli</i> (UFC/100mL)
1 URBANOS				
1.1 Residencial	1	10	2	0
1.2 Servicios	1	20	10	200
2 AGRICOLAS				
2.1 Riego cultivos (contacto directo con partes comestibles)	1	20	10	100
2.2 Riego productos de consumo humano. Pastos. Acuicultura	1	35	Sin límite	1000
2.3 Cultivos leñosos. Cultivo flores. Riego cultivo industrial no alimentario.	1	35	Sin límite	10000
3 INDUSTRIALES				
3.1 Aguas de proceso y limpieza (no alimentario)	Sin límite	35	15	10000
3.1.1 Aguas de proceso y limpieza industria alimentaria	1	35	Sin límite	1000
3.2 Torres de refrigeración y condensadores.	1	5	1	0
4 RECREATIVOS				
4.1 Riego campos de golf	1	20	10	200
4.2 Estanques. Masas de agua	Sin límite	35	Sin límite	10000
5 AMBIENTALES				
5.1 Recarga de acuíferos por percolación localizada	Sin límite	35	Sin límite	1000
5.2 Recarga de acuíferos por inyección directa	1	10	2	0
5.3 Riego bosques, zonas verdes. Silvicultura.	Sin límite	35	Sin límite	Sin límite
5.4 Otros usos: mantenimiento de humedales, caudales mínimos, etc.	Depende del caso			

Cabe destacar, que además de tener en cuenta los criterios de calidad existentes en esta normativa, deberán considerarse otros incluidos en materias específicas. Por ejemplo, debe considerarse la Directiva 2006/118/CE, relativa a la protección de aguas subterráneas contra la contaminación y el deterioro, cuando el agua regenerada se destine a uso ambiental.

2.3. Depuración de aguas residuales urbanas

2.3.1. Autodepuración de los ríos

En el equilibrio de la naturaleza, la depuración se realiza en los cursos de agua mediante los mecanismos de autodepuración. Se trata de la capacidad de los sistemas naturales para modificar la composición del agua que reciben y eliminar contaminantes, provocando así la destrucción de materias extrañas incorporadas. Principalmente son las bacterias aerobias que consumen materia orgánica con ayuda del oxígeno disuelto en el agua las que se encargan de esta eliminación. Además, hay que añadir las plantas y animales acuáticos, que asimilan algunos componentes en forma de nutrientes, así como otros procesos fotoquímicos, diluciones...

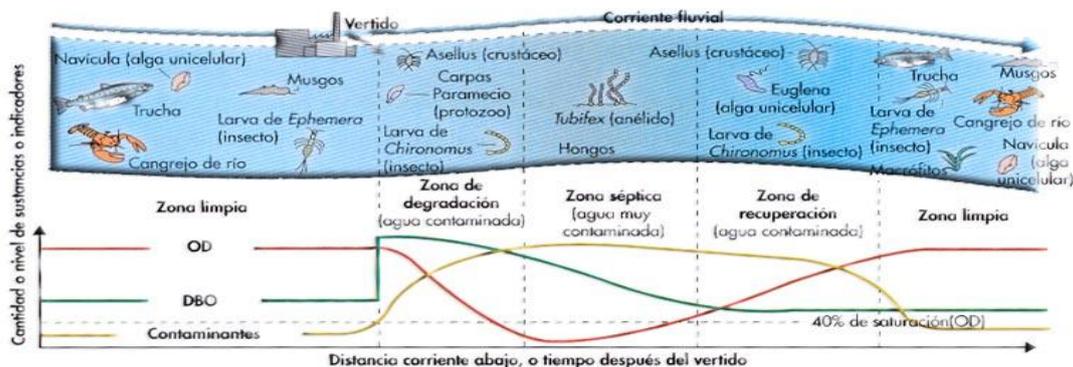


Figura 1. Esquema del mecanismo de autodepuración de los ríos. Fuente: BiologíaSur

En la actualidad, debido al aumento de la población, del nivel de vida y a las actividades del hombre, el vertido de aguas residuales se ha incrementado. De manera que para mantener el ciclo natural y posibilitar la recuperación de esta capacidad del agua, es necesario emplear sistemas de tratamiento de aguas residuales. Para ello están las EDAR, un conjunto de infraestructuras, mecanismos e instalaciones encargados del tratamiento de las aguas residuales mediante la aplicación de operaciones de tipo físico, químico y biológico. De este modo, lo que se hace es acelerar e intensificar los procesos de autodepuración, forzándolos en un tiempo y un espacio mínimos, con el fin de producir un efluente que pueda ser vertido sin alterar sustancialmente la calidad de las masas de agua receptoras evitando así causar serios impactos en el medio ambiente.

En este sentido, las depuradoras no pueden considerarse como entes aislados, sino como partes integrantes del ciclo natural (Trapote, 2011). En la Figura 2 queda ilustrado dicho concepto:

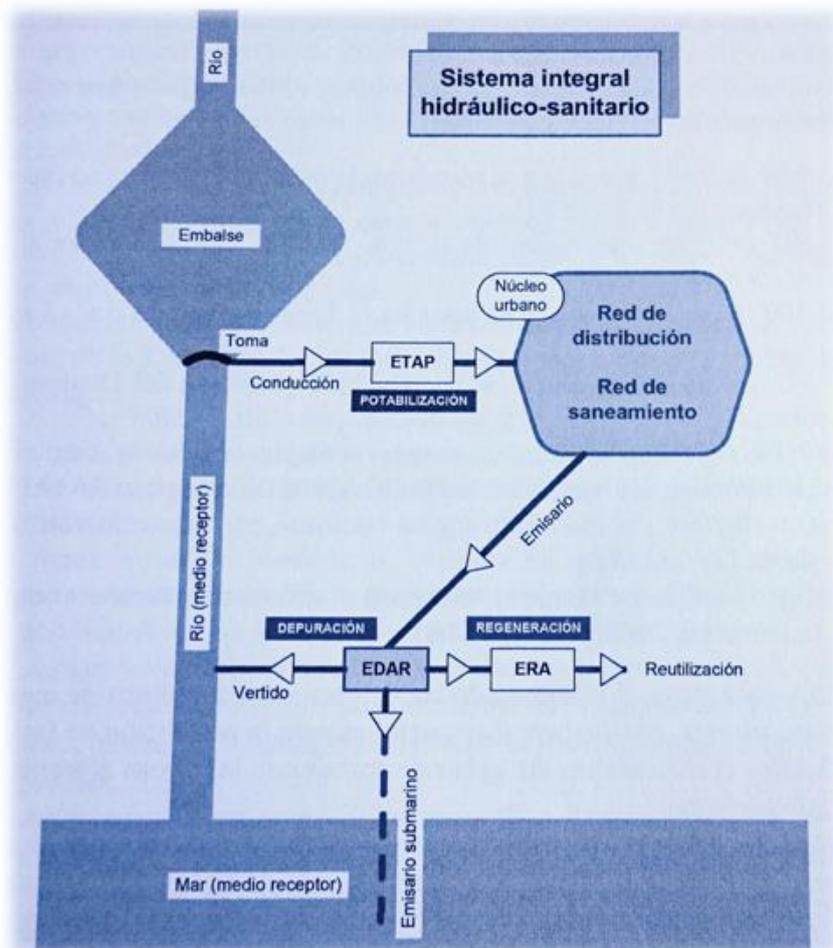


Figura 2. Esquema del sistema integral hidráulico-sanitario. Fuente: Trapote, 2011

El ciclo comienza con la toma de agua y su transporte hasta la Estación de Tratamiento de Aguas Potables (ETAP). A partir de aquí, el agua potabilizada es suministrada al núcleo urbano a través de la red de distribución.

A continuación, las aguas usadas (aguas residuales) se recogen en la red de saneamiento y son enviadas hacia la EDAR, donde serán sometidas a los procesos de tratamiento exigidos por la normativa vigente (Directiva 91/271/CEE).

Por último, las aguas depuradas pueden ser vertidas al medio receptor o pueden ser objeto de tratamientos complementarios, ya sea para adecuar su calidad a su uso posterior según el RD 1620/2007 (reutilización) ampliando así el ciclo que el agua realiza desde su captación y ofreciendo nuevas alternativas para su aprovechamiento, o simplemente de cara al cumplimiento de la ley. Dicha regeneración se lleva a cabo en las Estaciones de Regeneración de Aguas Residuales (ERAR).

2.3.2. Características generales de una EDAR

El objetivo principal del tratamiento de aguas residuales es producir un efluente que pueda ser descargado sin causar serios impactos en el medio ambiente, lo que implica, conforme a la

normativa vigente, cumplir unas determinadas tasas de eliminación de los contaminantes, principalmente DQO y SS.

Para ello es necesario llevar a cabo una serie de operaciones y procesos unitarios diseñados para reducir, entre otros, dichos contaminantes hasta niveles aceptables. Este conjunto de operaciones y procesos conforma la denominada línea de aguas. Además, en una EDAR también se puede llevar a cabo el tratamiento y acondicionamiento de los fangos resultantes del proceso de depuración. El conjunto de procesos utilizados para tratar los lodos constituye la línea de fangos (Metcalf and Eddy, 1995).

Una vez conocido el papel que desempeñan las EDAR, a continuación se explica y describe su funcionamiento clasificando los sistemas de tratamiento en función del grado de depuración conseguido (Trapote, 2011). Además se hace hincapié en aquellos procesos de depuración utilizados por las EDAR objeto de estudio aportando así mayor información acerca de las plantas de tratamiento donde se han llevado a cabo los muestreos.

2.3.2.1. Línea de aguas

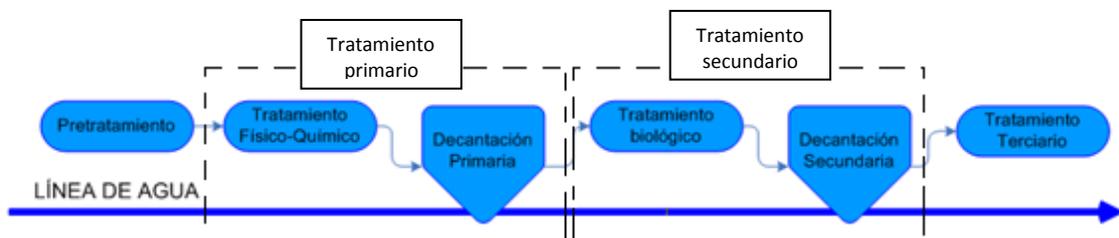


Figura 3. Diagrama de bloques de la línea de aguas de una EDAR. Fuente: Elaboración propia

Destacar que las operaciones y procesos unitarios se agrupan, combinan y utilizan conjuntamente en la EDAR en función del grado de eliminación de los contaminantes presentes en el agua residual, es decir, como más convenga en cada caso.

- **Pretratamiento**, tiene como objetivo separar del agua residual las materias groseras, que por su naturaleza o tamaño podrían causar problemas tanto operacionales como de mantenimiento de las instalaciones. Desde grandes sólidos y materias flotantes de gran tamaño, hasta gravas, arenas y sólidos de pequeño tamaño, pasando por aceites y grasas.

Las operaciones que comprende generalmente el pretratamiento son: desbaste, desarenado y desengrasado.

- **Desbaste**. Consiste en la eliminación de los sólidos por interceptación. El procedimiento normal consiste en hacer pasar el agua a través de unas rejillas y/o tamices que, en función del paso libre entre barrotes y barrotes, separará sólidos finos, medios o gruesos.

- **Desarenado-desengrasado**. Consiste en la extracción de sólidos sedimentables como gravas, arenas...de origen no orgánico mediante decantación diferencial, impidiendo la sedimentación de la materia orgánica en suspensión. Para ello se utilizan fundamentalmente unos desarenadores aireados que inyectan aire desencadenando un giro de la masa de agua que permite también un desengrasado en superficie, aunando dos procesos en la misma

estructura. Por tanto, las grasas, espumas y demás materias flotantes sólidas más ligeras también son eliminadas y su extracción es por rebose.

Aunque el efecto de esta fase es nulo en cuanto a rendimiento se refiere (disminución de materia orgánica y sólidos en suspensión), elimina una parte considerable del agua residual que puede ser medida por el peso de residuos extraídos durante las operaciones comprendidas.

- **Tratamiento primario**, tiene como objetivo separar del agua residual una parte de los sólidos en suspensión (insolubles), sedimentables por gravedad, y los elementos solubles y coloidales (coagulación-floculación y posterior decantación).

Las operaciones más frecuentes son: decantación o sedimentación primaria, flotación y tratamiento físico-químico.

· Decantación primaria. La finalidad es la reducción de los sólidos en suspensión bajo la exclusiva acción de la gravedad, de manera que solamente tendrá lugar la eliminación de sólidos sedimentables y materias flotantes.

· Tratamiento físico-químico. Consiste en añadir al agua residual determinados reactivos químicos (coagulantes-floculantes) que alteran su estado físico. Los reactivos más utilizados son el hidróxido cálcico y las sales de hierro. De este modo tiene lugar el proceso de coagulación-floculación, es decir, la formación y desestabilización de coloides para su posterior agrupación con el fin de generar partículas con una determinada entidad capaces de precipitar (flóculos). Como norma general, este proceso se utiliza para tratar vertidos de origen industrial.

En cuanto a rendimientos, la reducción de sólidos en suspensión oscila aproximadamente entre el 50 y el 70%, mientras que la reducción de la DBO₅ es de un 25 a un 40%.

- **Tratamiento secundario**, tiene como objetivo eliminar la mayor parte de la materia orgánica coloidal. Se trata principalmente de procesos de tipo biológico entre los que cabe distinguir fangos activados y lechos bacterianos principalmente. Otras operaciones son: biodiscos y biocilindros, estanques de estabilización, lagunaje natural, filtros verdes...

· Fangos activados. Es el proceso biológico más utilizado. Consiste en la eliminación de la materia orgánica biodegradable presente en el agua residual mediante una biomasa o conjunto de microorganismos que la utilizan como sustrato o fuente de alimentación, descomponiéndola vía aerobia. La reacción bioquímica que tiene lugar es la siguiente:



En este proceso se distinguen dos operaciones diferenciadas: la oxidación biológica y la separación sólido-líquido.

La primera de ellas tiene lugar en el reactor, donde se provoca el desarrollo de un cultivo biológico formado por gran número de microorganismos agrupados en flóculos (fangos activados). Es importante mantener la población bacteriana a un determinado nivel para llegar

a un equilibrio entre la carga orgánica a eliminar y la cantidad de microorganismos existentes en el reactor.

El proceso consiste en lo siguiente: los microorganismos capturan la materia orgánica biodegradable presente, alimentándose de ella y provocando su eliminación a través de reacciones bioquímicas de oxidación y síntesis. Una vez que la materia orgánica ha sido suficientemente oxidada, el licor mezcla (agua-biomasa) se envía al clarificador o decantador secundario en el que se separan el agua depurada y los fangos floculados. Estos últimos se recirculan al reactor biológico y el excedente se extrae del sistema y se evacua hacia el tratamiento de fangos.

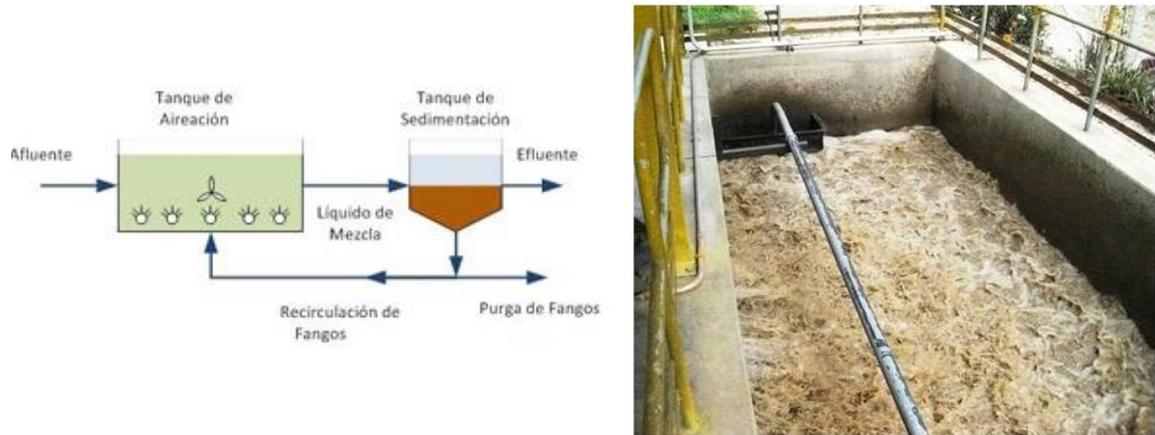


Figura 4. Diagrama y foto real del tratamiento de fangos activados. Fuente: INGECONSERSA y Elaboración propia

Para su desarrollo, es necesario un sistema de aireación y agitación que suministre el oxígeno necesario para activar la acción depuradora de las bacterias aerobias. También para evitar la sedimentación de los flóculos en el reactor manteniéndolos en suspensión, y para la homogeneización de los fangos activos.

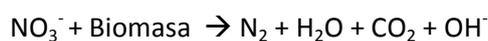
Este proceso de aireación en el tanque biológico permite que al mismo tiempo que se descomponga y elimine la materia orgánica, se puedan llevar a cabo una serie de reacciones de nitrificación-desnitrificación. Este proceso consiste en la oxidación del nitrógeno amoniacal y orgánico a nitratos a través de dos etapas. En la primera etapa tiene lugar la oxidación del nitrógeno orgánico y amoniacal a nitrito. Esta reacción es llevada a cabo por bacterias del género nitrosomas:



En la segunda fase y mediante bacterias del género nitrobacter, tiene lugar la oxidación del nitrito a nitrato.



El proceso de desnitrificación ocurre cuando la cantidad de oxígeno en el medio es mínima, y por tanto las necesidades de este elemento por la biomasa son solventadas por el oxígeno disponible en la molécula de nitrato, de forma que:



· Lechos bacterianos, también llamados filtros percoladores. Su funcionamiento consiste en hacer caer el agua a tratar, previamente decantada, en forma de lluvia y homogéneamente, sobre una masa de material de gran superficie específica que sirve de soporte a los microorganismos depuradores.

La materia orgánica y sustancias contaminantes del agua son degradadas en una película biológica compuesta por microorganismos que se desarrollan alrededor de los elementos constitutivos de la masa porosa (biofilm). Cuando los microorganismos se desarrollan, el espesor de dicha película aumenta hasta el punto en que el oxígeno no llega hasta las capas inferiores de la biomasa, la cual perece. Esto provoca que la masa biológica pierda su capacidad de adherencia y sea arrastrada por el líquido, provocando los llamados fangos biológicos. Por último, el efluente recolectado debe ser clarificado en un tanque de sedimentación para evacuar dichos fangos de la línea de aguas.

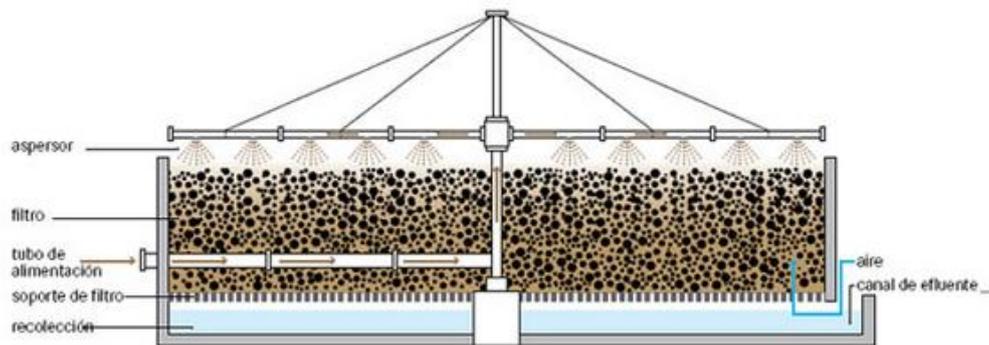


Figura 5. Diagrama del proceso de lechos bacterianos. Fuente: Fundación EOI, 2005



Figura 6. Foto real del proceso de lechos bacterianos. Fuente: Elaboración propia

Destacar que, aunque los lechos bacterianos y los fangos activados se basan en la acción de los organismos aerobios, para llevar a cabo la descomposición, existe entre ellos una diferencia operacional. En los lechos, los organismos están adheridos al medio de fijación y en ellos se recibe el material orgánico a transformar. En cambio, en el proceso de fangos activados son los organismos los que buscan la materia orgánica de las aguas residuales.

· Lagunaje natural. Consiste en el almacenamiento de las aguas residuales durante un tiempo variable en función de la carga aplicada y de las condiciones climáticas, de forma que la materia orgánica resulte degradada mediante la actividad de los microorganismos presentes en el medio acuático. El proceso de depuración tiene lugar gracias a reacciones biológicas, químicas y físicas, que ocurren en las lagunas y que tienden a estabilizar el agua residual. Los fenómenos que se producen tienen relación con la sedimentación, oxidación, fotosíntesis, digestión, aireación y evaporación.



Figura 7. Foto real del proceso de lagunaje natural. Fuente: Elaboración propia

Una vez detallados los procesos utilizados en las EDAR objeto de estudio, destacar que tras tratamiento secundario, según el proceso utilizado (filtros percoladores y fangos activos por ejemplo), el efluente pasará por una etapa de clarificación (decantación secundaria) para eliminar los flóculos biológicos que se han producido.

En cuanto a rendimientos del tratamiento secundario, la reducción de sólidos en suspensión oscila aproximadamente entre el 80 y el 95%, y la reducción de la DBO_5 entre un 85 y un 95%.

Como norma general, las siguientes dos fases no están presentes en las EDAR convencionales.

- **Tratamiento terciario**, constituido por los procesos que se aplican a las aguas residuales para obtener mejores rendimiento y adaptar así la calidad de las aguas residuales a las normas establecidas según el posterior uso del efluente (tratamientos de regeneración para reutilización) o el destino del medio receptor. Por ello, también suelen denominarse tratamientos complementarios, de afino o avanzados.

Los procesos más utilizados son: filtración, nitrificación/desnitrificación, adsorción sobre carbón activo, intercambio iónico y ósmosis inversa.

De éste modo, el rendimiento alcanzado es del 95-96% en la eliminación de sólidos en suspensión y del 95-98% en la de DBO_5 .

- **Desinfección**, cuyo principal objetivo es la destrucción de organismos patógenos mediante medios físicos o químicos para prevenir enfermedades o proteger al cauce receptor. Los métodos disponibles son la cloración, ozonización, radiación ultravioleta entre otros.

Además, los efluentes adecuadamente tratados pueden ser reutilizados sirviendo como recurso en aquellos casos en que la calidad del agua requerida sea inferior, según marca el RD 1620/2007 por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas de depuradora.

2.3.2.1. Línea de fangos

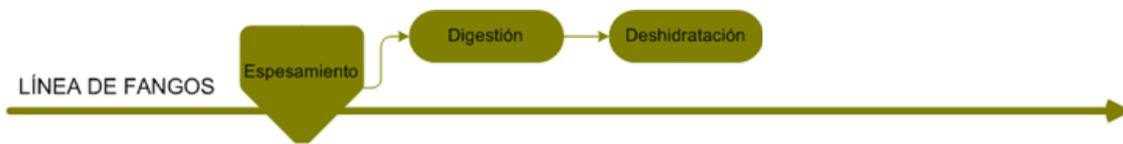


Figura 8. Diagrama de bloques de la línea de fangos de una EDAR. Fuente: Elaboración propia

- **Espesamiento**, así se consigue un incremento de la concentración de los fangos por eliminación de agua, reduciéndose de éste modo el volumen de los mismos y mejorando el rendimiento de los procesos posteriores. Los métodos de espesamiento más conocidos son el de gravedad y por flotación.

- **Estabilización o digestión**, cuyo objetivo es reducir el contenido de materia volátil a fin de hacer el residuo más estable y reducir su capacidad de putrefacción. Es decir, se elimina o destruye la materia orgánica presente de manera controlada y acelerada.

Los sistemas más habituales son: digestión aerobia y anaerobia, estabilización química mediante el aumento del pH por adición de cal, tratamientos térmicos o compostaje.

- **Deshidratación**, la finalidad de este proceso es eliminar agua del fango para convertirlo en un sólido fácilmente transportable y manejable. Los sistemas más utilizados son los mecánicos, como la centrifugación.

Disposición final de los fangos. La evacuación final de los fangos deshidratados debe tener en cuenta condicionantes de tipo técnico-económico, legal y medioambiental. Como alternativas a la disposición final pueden considerarse: descarga en vertederos específicos o de residuos sólidos urbanos, uso agrícola, incineración y reutilización para fabricación de materiales.

En la Figura 9 se muestra un diagrama de bloques que representa de manera sencilla los procesos y elementos que constituyen una EDAR.

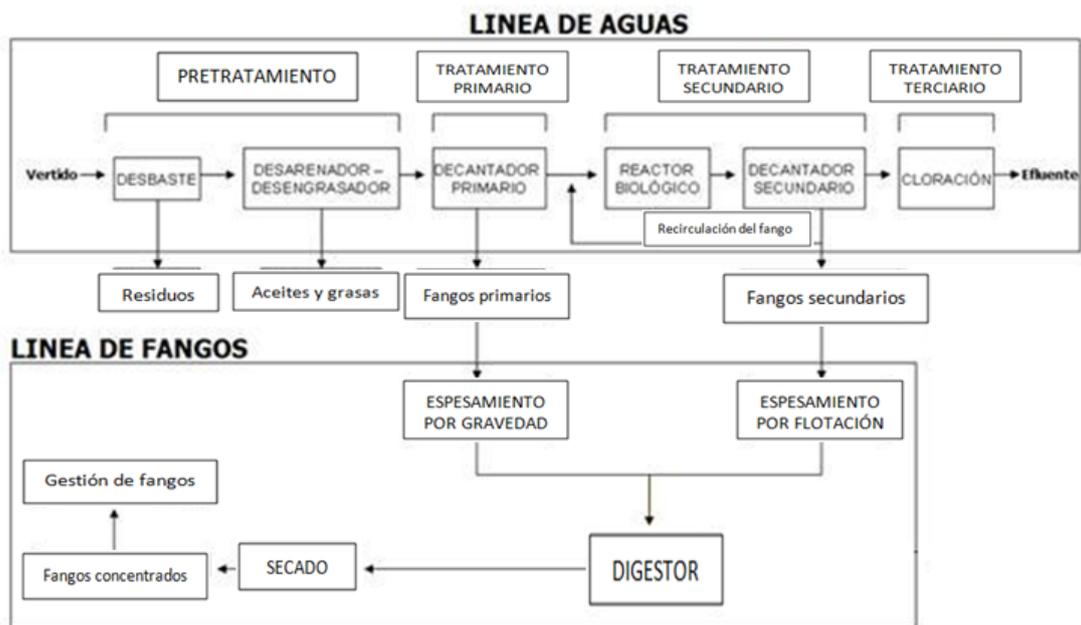


Figura 9. Etapas de una EDAR biológica. Fuente: Elaboración propia

2.3.3. Características de las EDAR objeto de estudio

2.3.3.1. EDAR A

· Características del agua de entrada a la planta

En esta EDAR se tratan aguas pluviales y residuales de origen urbano así como industrial debido a la actividad agroalimentaria presente en la zona. El caudal medio de aguas residuales tratadas al día es de 2963 m³/día (siendo su caudal de diseño de 3500 m³/día) con una carga orgánica media de 2522 kg DBO₅/día (carga de diseño 2450 kg DBO₅/día). La población censada es de 4758 habitantes y la EDAR lleva una carga de 15869 habitantes equivalentes.

Las principales características del agua bruta en mg/L quedan recogidas en la Tabla 5. Destacar que los valores corresponden al resultado de la media anual del año 2013, de manera que son representativos puesto que debido a los vertidos industriales entre otras cosas, dichas concentraciones sufren picos según la época del año llegando a duplicar la carga orgánica:

Tabla 5. Características del agua residual urbana de la EDAR A

	Materia en suspensión (mg/L)	DQO (mg O ₂ /L)	DBO ₅ (mg O ₂ /L)
ENTRADA	1061	1565	851

· Descripción de la planta

Su sistema depurativo se basa en un proceso de lechos bacterianos seguido por un lagunaje natural. Su vertido se realiza en la cuenca del Ebro. También cuenta con dos instalaciones de tratamiento avanzado de fangos.

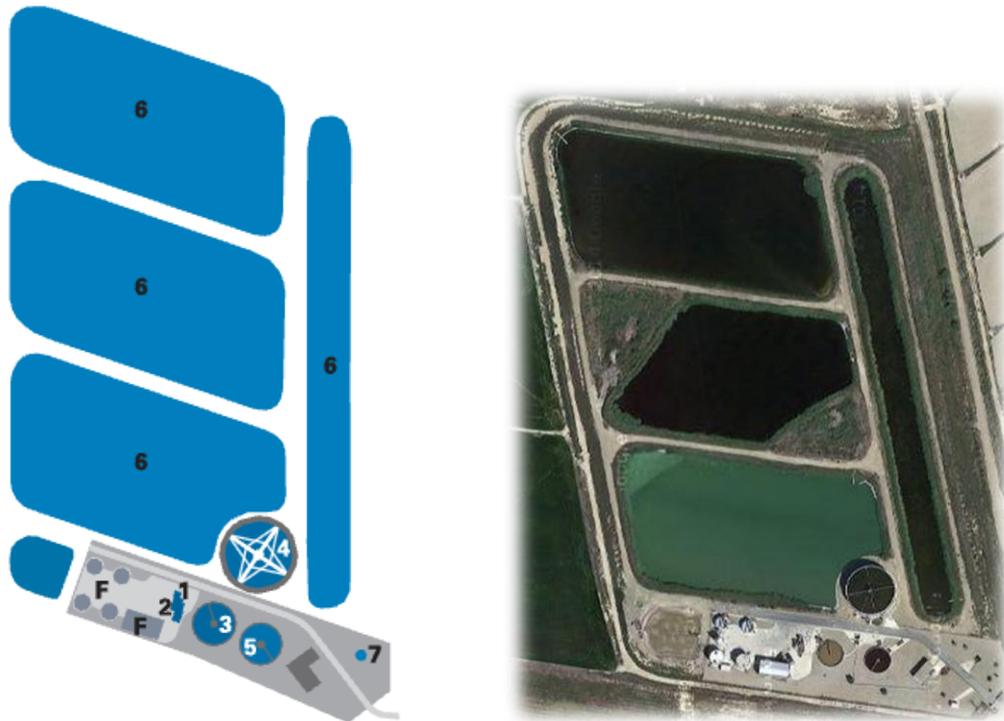


Figura 10. Dibujo esquemático y vista real de la EDAR A. Fuente: Google Earth

Tal y como muestra la Figura 10, las etapas de la EDAR son:

- | | |
|---|--------------------------|
| 1. Entrada, bombeo de agua | 5. Decantador secundario |
| 2. Pretratamiento | 6. Lagunaje natural |
| 3. Decantador primario | 7. Efluente |
| 4. Filtros percoladores | |
| F. Almacenamiento y digestión de fangos | |

El agua llega a través de los colectores a la planta depuradora. Una vez allí, el caudal, y por tanto la carga contaminante, quedan regulados mediante una balsa de homogeneización con el fin de amortiguar los posibles altibajos. A continuación, el agua residual pasa por un pretratamiento, formado por tamices, para eliminar sólidos, y por un desarenador-desengrasador para eliminar grasas y arenas. Después el agua pasa a un decantador primario con un tiempo de retención de 3 a 6 horas. Los fangos decantados son retirados para su posterior tratamiento.

El agua de salida del decantador pasa al reactor biológico de filtros percoladores, también conocidos como lechos bacterianos. Dichos filtros son de plástico y es en ellos donde proliferan las bacterias que degradan la materia orgánica. En la decantación secundaria los lodos se recirculan al decantador primario y para terminar, el agua pasa a un tratamiento por lagunaje consistente en 4 lagunas en serie de 2,5m de profundidad. El tiempo de residencia es de unos 25 días. No todas están siempre operativas debido a labores de mantenimiento o limpieza. De éste modo el agua ya está en condiciones de ser vertida a la cuenca del Ebro.

Por otro lado, los fangos de la salida del decantador primario son dirigidos a un digestor y tratados con el sistema ATAD (Digestión aerobia termófila autosostenida). Después son

secados mediante centrífugas obteniendo así fango deshidratado, manejable y fácil de transportar.

Tras estas operaciones, las características del agua de salida (media anual 2013) con sus respectivos rendimientos de reducción quedan recogidos en la Tabla 6:

Tabla 6. Características del agua de salida y rendimientos de la EDAR B

	Materia en suspensión (mg/L)	DQO (mg O₂/L)	DBO₅ (mg O₂/L)
SALIDA	17	63	14
Rendimiento	98%	96%	98%

2.3.3.2. EDAR B

· Características del agua de entrada a la planta

En esta EDAR se reciben aguas de origen doméstico principalmente. El caudal medio de agua residual tratada al día es de 532 m³/año (siendo su caudal de diseño de 1800 m³/día) con una carga orgánica media de 276 kg DBO₅/día (carga de diseño 336 kg DBO₅/día). La población censada es de 3361 habitantes y la EDAR lleva una carga de 4367 habitantes equivalentes.

Las principales características del agua bruta en mg/L están en la Tabla 7, nuevamente corresponden al resultado de la media anual del año 2013, de manera que son representativos:

Tabla 7. Características del agua residual EDAR B

	Materia en suspensión (mg/L)	DQO (mg O₂/L)	DBO₅ (mg O₂/L)
ENTRADA	350	960	519

· Descripción de la planta

La tecnología de depuración utilizada es un sistema de fangos activados. El cauce receptor del agua tratada es nuevamente la cuenca del Ebro.

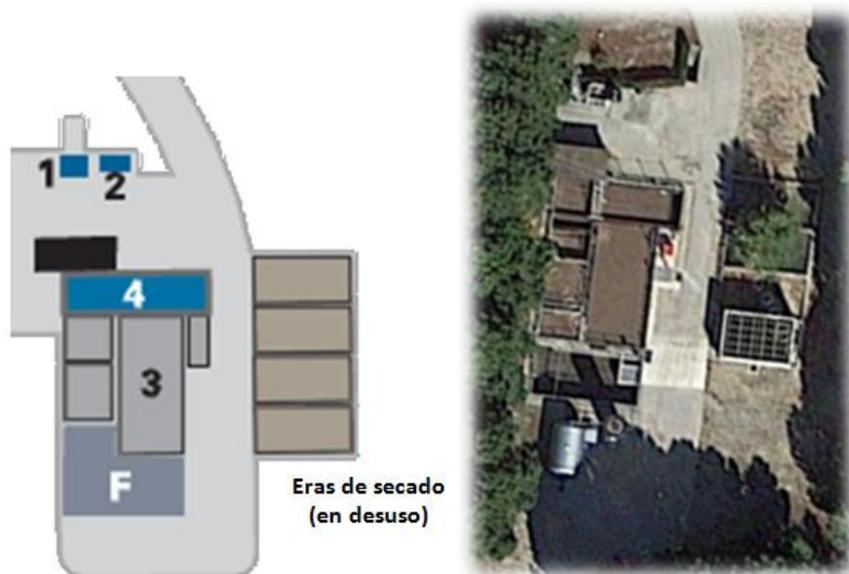


Figura 11. Dibujo esquemático y vista real de la EDAR B. Fuente: Google Earth

Tal y como muestra la Figura 11, las etapas de la EDAR son:

1. Entrada, bombeo de agua
2. Pretratamiento
3. Reactor biológico fangos activos aerobio
4. Decantador secundario

F. Almacenamiento y espesador de fangos

El agua llega a través de los colectores a la planta depuradora. Una vez allí, tiene lugar el pretratamiento para eliminar sólidos mediante tamices. A continuación, con el fin de disminuir la cantidad de nitrógeno y fósforo, el agua pasa a un reactor biológico anóxico para después someterse a un tratamiento de fangos activados para eliminar gran parte de la materia orgánica presente. Tras el tratamiento biológico, el agua pasa a un decantador con un tiempo de retención de 3 a 6 horas. Los fangos decantados son retirados para su posterior tratamiento en un espesador y el agua toma dos caminos. Por un lado, es vertida a la cuenca del Ebro, y por otro, atraviesa un filtro. De éste modo se consigue disminuir el contenido de sólidos en suspensión presentes en el efluente cumpliendo así la normativa vigente.

Tras estas operaciones, las características del agua de salida (media anual 2013) con sus respectivos rendimientos de reducción quedan recogidos en la Tabla 8:

Tabla 8. Características del agua de salida y rendimientos de la EDAR B

	Materia en suspensión (mg/L)	DQO (mg O₂/L)	DBO₅ (mg O₂/L)
SALIDA	14	43	12
Rendimiento	96%	95,5%	98%

2.3.3.3. EDAR C

- Características del agua de entrada a la planta

El agua bruta de esta EDAR está compuesta de aguas pluviales, residuales de origen urbano en su mayoría y de tipo industrial, y lixiviados procedentes de un vertedero cercano a la zona. El caudal de aguas residuales tratadas al día es de 19997 m³/día (siendo su caudal de diseño de 22150 m³/día) con una carga orgánica de 5219 kg DBO₅/día (carga de diseño 6879 kg DBO₅/día). La población censada es de 38969 habitantes y la EDAR lleva una carga de 46237 habitantes equivalentes.

Las principales características del agua bruta en mg/L quedan recogidas en la Tabla 9. Se trata de valores representativos puesto que son el resultado de la media anual del año 2013 y, al igual que ocurre en la EDAR A, dichas concentraciones sufren picos según la época del año:

Tabla 9. Características el agua residual EDAR C

	Materia en suspensión (mg/L)	DQO (mg O₂/L)	DBO₅ (mg O₂/L)
ENTRADA	339	530	261

· Descripción de la planta

La tecnología aplicada para la depuración de aguas residuales es un proceso de lechos bacterianos. También cuenta con instalaciones para el tratamiento de fangos. El cauce receptor es el río Ebro.

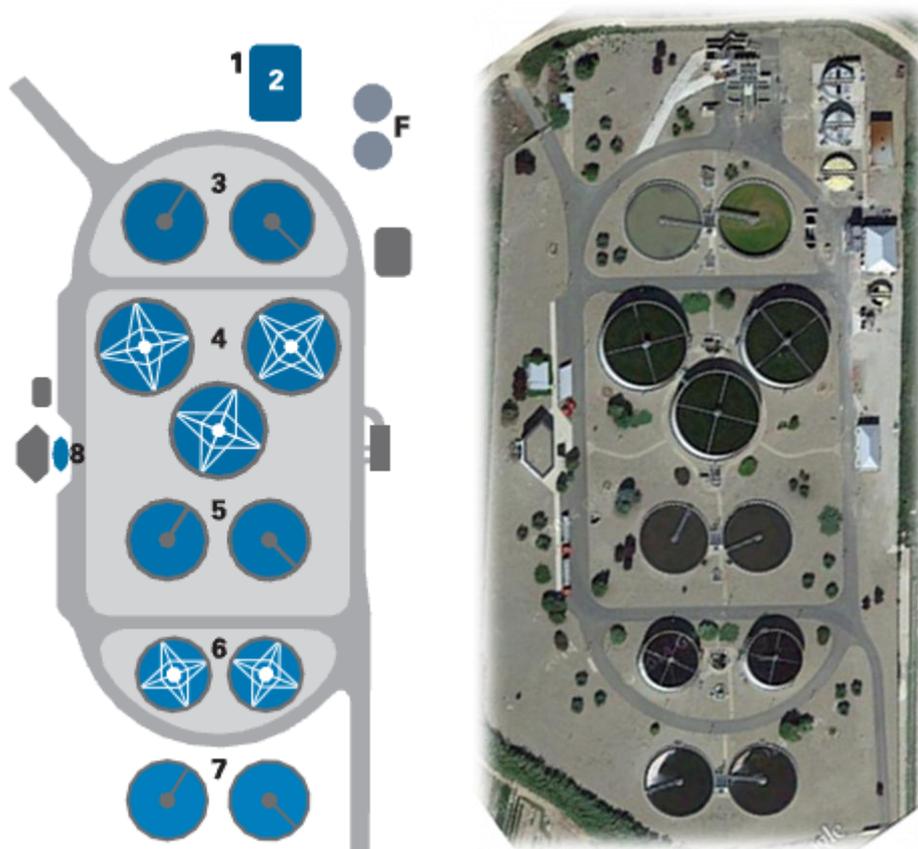


Figura 12. Dibujo esquemático y vista real de la EDAR C. Fuente: Google Earth

Tal y como muestra la Figura 12, las etapas de la EDAR son:

1. Bombeo de entrada a la planta
2. Pretratamiento
3. Decantadores primarios (2)
4. Reactores biológicos de lecho bacteriano de alta carga (3)
5. Decantadores intermedios (2)
6. Reactores biológicos de lecho bacteriano de baja carga (2)
7. Decantadores secundarios (2)
8. Efluente

F. Almacenamiento y digestión de fangos

El funcionamiento de la EDAR C es idéntico al desarrollado por la EDAR A. Una vez que el agua llega a la planta a través de los colectores, es sometida a un pretratamiento formado por un sistema de rejillas y un desarenador-desengrador, para terminar en un decantador primario.

A la salida del decantador, el agua pasa a un reactor biológico de lechos bacterianos. La diferencia reside en que en éste caso, dicho tratamiento secundario se repite dos veces con el fin de reducir la carga contaminante al máximo puesto que los caudales recibidos son superiores a los de la EDAR A.

De manera que, tras pasar por los lechos bacterianos de alta y baja carga y por sus respectivos decantadores, el agua ya puede ser vertida al río.

Por otro lado, como también ocurre en la EDAR A, los fangos de la salida del decantador primario, intermedio y secundario, son dirigidos a un digestor y tratados con el sistema ATAD (Digestión aerobia termófila autosostenida). Por último, son secados mediante centrifugas obteniendo así el fango deshidratado.

Tras estas operaciones, las características del agua de salida (media anual 2013) con sus respectivos rendimientos de reducción quedan recogidos en la Tabla 10:

Tabla 10. Características del agua de salida y rendimientos de la EDAR C

	Materia en suspensión (mg/L)	DQO (mg O₂/L)	DBO₅ (mg O₂/L)
SALIDA	16	56	17
Rendimiento	95%	98%	93,5%

2.4. Reutilización de aguas residuales urbanas

2.4.1. Justificación e importancia de la reutilización de aguas residuales urbanas

El agua ha sido considerada hasta hace pocos años como un recurso prácticamente ilimitado. Sin embargo, el continuo aumento de su demanda, en algunos casos por encima de la cantidad disponible, ha empezado a preocupar y ha inducido a plantearse diferentes alternativas con el fin de maximizar los recursos hídricos disponibles.

Dicha escasez, es consecuencia del aumento de la actividad industrial y el consiguiente desarrollo económico y social de las últimas décadas, que han ido produciendo un crecimiento de las grandes ciudades complicando así el suministro de dicho recurso. De manera que, la demanda creciente de agua ligada al interés por proteger el medio ambiente, ha afianzado el criterio de que la regeneración y posterior utilización de las aguas residuales constituye una fuente idónea y fiable para sustituir recursos de primera utilización en usos que no requieren un grado de calidad tan alto.

2.4.2. Historia de la reutilización de aguas residuales urbanas

Los primeros pasos en el campo de la reutilización del agua residual están identificados con la práctica histórica de la evacuación y aplicación del agua residual al terreno. Con la llegada de las redes de alcantarillado en el siglo XIX, las aguas residuales domésticas fueron vertidas al terreno, constituyendo la denominada “sewage farms”, tanto en Europa como en Estados Unidos (Metcalf and Eddy, 1995). Se trataba de huertas abonadas con aguas residuales. Su funcionamiento se basaba en descomponer las aguas residuales a través del cultivo debido a la combinación de microbios y bacterias presentes.

Posteriormente y como consecuencia de la necesidad de hacer frente a una mayor demanda y el aumento del conocimiento acerca de la materia, se observó la poca viabilidad de estos procedimientos, se sustituyeron por plantas de tratamiento, y se desarrollaron varios proyectos de recuperación y reutilización de aguas residuales (Metcalf and Eddy, 1995).

Una evidencia de ello es que en 1962, en Arizona, se utilizó por primera vez el agua residual de un sistema de abastecimiento para su uso en lavabos, sistemas de aspersión de zonas verdes y como agua de refrigeración y calefacción (Metcalf and Eddy, 1995).

En las últimas décadas, el interés por el aprovechamiento de las aguas residuales urbanas que han recibido tratamientos avanzados de depuración ha ido en aumento. La regeneración y reutilización de las aguas residuales cobran un papel de gran importancia, pues además de solucionar el problema de contaminación, permiten aumentar la disponibilidad del recurso sin necesidad de seguir explotando las fuentes convencionales para el suministro de agua (Seguí, 2004).

De tal manera es así, que surge la necesidad de implantar el RD 1620/2007, nombrado en el apartado de legislación 2.2. de esta memoria. A partir de entonces se entiende por agua regenerada al agua residual depurada que ha pasado por un proceso adicional o complementario con el fin de alcanzar la calidad requerida para un uso concreto. Así mismo, se habla de reutilización de las aguas al aplicar éstas para un nuevo uso privativo después de haber sido sometidas a los procesos de depuración establecidos para alcanzar la calidad requerida en función de los usos.

Para todos los usos posibles que marca el RD 1620/2007, se establecen los criterios mínimos de calidad exigida en relación a diversos parámetros microbiológicos, orgánicos y físico-químicos (recogidos en el anexo I de la norma y en la Tabla 4 del presente trabajo).

2.4.3. Situación actual de la reutilización de aguas residuales urbanas en España

Según el Plan Nacional de Reutilización de Aguas, la distribución por usos del agua en España es el siguiente (Figura 13): se sitúa en unas tres cuartas partes para uso agrícola, del orden del 71% (y creciendo) ambientales, el 7,1% para uso recreativo, el 4% para usos urbanos, y del orden del 0,3% para uso industrial (CEDEX, 2006).

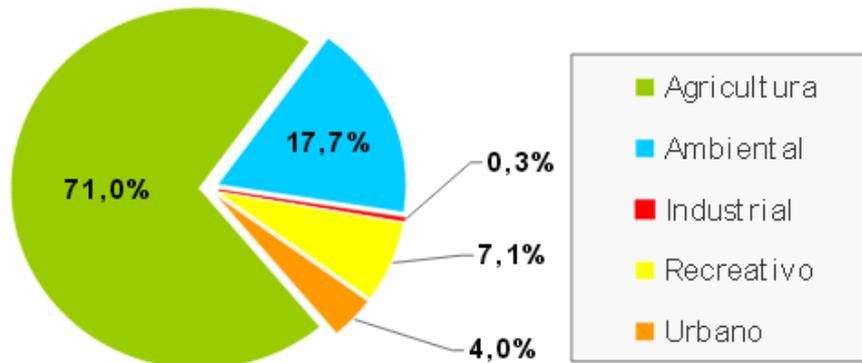


Figura 13. Usos a los que se destinan las aguas regeneradas de España. Fuente: CEDEX-Ministerio de Medio Ambiente, 2006

Cabe destacar, que para dar cumplimiento al RD 1620/2007, se precisa realizar en todos los casos un tratamiento de regeneración del agua que reduzca al menos la contaminación debida a la materia en suspensión, la turbidez, las sustancias peligrosas presentes y además desinfecte el agua hasta los límites marcados por la ley. Dicho tratamiento se realiza en la Estación de Regeneración de Aguas Residuales Depuradas (ERAR). En la Figura 14 puede verse un esquema general de todo el proceso que sigue el agua para su reutilización.



PEAD: Punto de entrega de las aguas depuradas. PEAR: Punto de entrega de las aguas regeneradas

Figura 14. Esquema de un sistema de reutilización de aguas residuales urbanas. Fuente: Ministerio de Medio Ambiente

Según el “Informe sobre la situación de la reutilización de efluentes depurados en España” (CEDEX, 2008), el volumen de agua reutilizada en España en 2006 alcanzó los 368 hm³/año aproximadamente, lo que suponía un 10,8 % del caudal de aguas residuales depurado.

España cuenta con 322 puntos que cuentan con sistemas de reutilización de aguas. De hecho, la reutilización de aguas constituye en algunas zonas un recurso estratégico, dándose una tendencia creciente a la reutilización (CEDEX, 2008).

A continuación, en la Figura 15 y 16, queda reflejada la ubicación de las plantas de tratamiento y el volumen de agua reutilizado en cada comunidad autónoma.

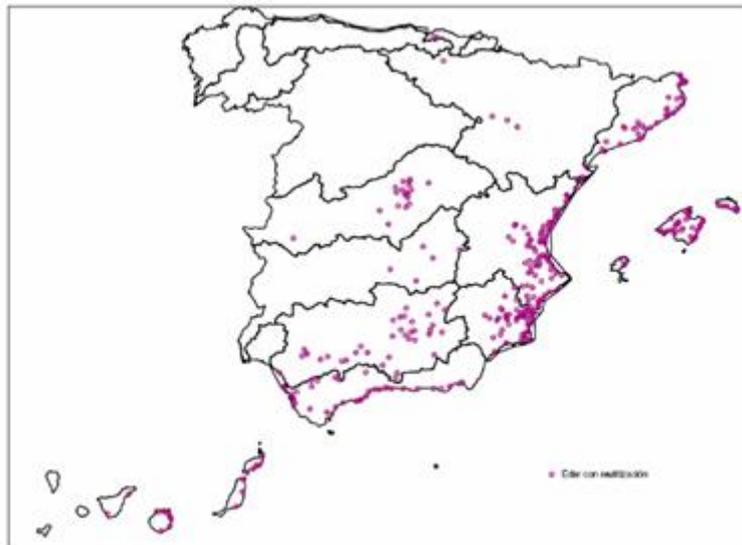


Figura 15. Distribución del número de sistema de reutilización (322). Fuente: CEDEX

Comunidad Autónoma	Caudal reutilizado (Hm ³ /año)
ANDALUCIA	24,21
ARAGON	0,17
BALEARES	28,24
CANARIAS	17,8
CASTILLA-LA MANCHA	2,96
CATALUÑA	44,16
VALENCIA	148,66
EXTREMADURA	0
MADRID	5,48
MURCIA	84,52
PAIS VASCO	12
Total	368,2



Figura 16: Volumen de agua reutilizada por Comunidades Autónomas. Fuente: CEDEX

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Toma de muestras y conservación

La toma de muestras se llevó a cabo en las instalaciones de 3 EDAR diferentes pertenecientes a la cuenca del Ebro. Se realizaron el martes de cada semana entre las 10 y las 12 del mediodía durante el intervalo de tiempo comprendido entre Diciembre del 2014 y Enero del 2015. El protocolo empleado fue el indicado en las Normas de la serie ISO 5667, donde quedan establecidas las pautas a seguir para llevar a cabo tanto la extracción de muestras así como su posterior conservación y manipulación.

Para la recogida de muestras se utilizaron dos tipos de envases, ambos de plástico, en función del análisis al que iban a ser sometidas. Para análisis microbiológico, envases estériles de 150ml y dos garrafas de 5 litros esterilizadas con el fin de evitar cualquier posible contaminación que pueda afectar a los agentes patógenos presentes en el agua objeto de estudio. Para las muestras destinadas al análisis físico-químico, recipientes limpios y correctamente homogeneizados de 500-1000ml.

Paralelamente, mientras se marcaban los botes conforme se empleaban, se iban tomando notas en una ficha para mantener toda la información ordenada e ir registrando los datos relativos a cada punto. También era en este momento cuando se realizaban las mediciones in situ de una serie de parámetros: pH, conductividad, temperatura y oxígeno disuelto. El modelo de ficha está basado en el modelo estandarizado y era el siguiente:

Tabla 11. Modelo de ficha utilizada en cada muestreo

MUESTRA	TIPO	HORA	PUNTO	Mediciones in situ			OBSERVACIONES
				pH	CONDUCT.	O ₂ DISUELTO / Tª	

Una vez recogidas las muestras se guardaban en un par de neveras con el fin de mantenerlas refrigeradas y en oscuridad hasta llegar al laboratorio. De este modo el grado de conservación es mayor y por tanto hay menor probabilidad de que los resultados obtenidos en los análisis se vean alterados por haber estado expuestas a condiciones inadecuadas.

En cuanto a la conservación de las muestras una vez en el laboratorio, las medidas tomadas fueron las siguientes:

- En el caso de las muestras destinadas al análisis microbiológico, al tener que ser analizadas en un periodo de tiempo inferior a 24 horas, simplemente se mantenían refrigeradas hasta unas dos o tres horas antes de ser utilizadas.

- En el caso de las muestras destinadas al análisis físico-químico, al medirse parámetros tan dispares, los métodos y tiempos de conservación varían. A pesar de ello, al analizarse después de los parámetros microbiológicos pero no pasadas las 48 horas, todas las muestras se guardaban en el frigorífico sin necesidad de ser acondicionadas.

A continuación se detallan los puntos en los que se han tomado muestras en cada una de las EDAR muestreadas:

3.1.1. Puntos de muestreo EDAR A

Como ya se ha comentado anteriormente, su sistema depurativo se basa en un proceso de lechos bacterianos seguido por un lagunaje natural. También cuenta con dos instalaciones de tratamiento avanzado de fangos.

Las muestras se tomaron el 2 de Diciembre del 2014, a la entrada y salida de cada una de las etapas de tratamiento que tienen lugar en la línea de aguas de la EDAR (Figura 17). Se tomaron muestras independientes en cada punto de muestreo para el análisis físico-químico y para el microbiológico. En total se recogieron 6 muestras líquidas o semilíquidas en recipientes estériles de 150ml para su posterior análisis microbiológico y 6 muestras de 500-1000ml en recipientes no estériles para el análisis de parámetros físico-químicos.

La Tabla 12 recoge las muestras tomadas en la línea de aguas:

Tabla 12. Descripción de los puntos de muestreo de la línea de aguas, EDAR A

MUESTRA	LÍNEA	TIPO MUESTRA	UBICACIÓN
M1	Agua	Agua	Salida laguna 4 (efluente)
M2	Agua	Agua	Salida laguna 3
M3	Agua	Agua	Salida laguna 2
M4	Agua	Agua	Salida decantador secundario
M5	Agua	Agua	Salida decantador primario
M6	Agua	Agua	Entrada a la planta

En la Figura 17 se observan los puntos de muestreo descritos en la Tabla 12:

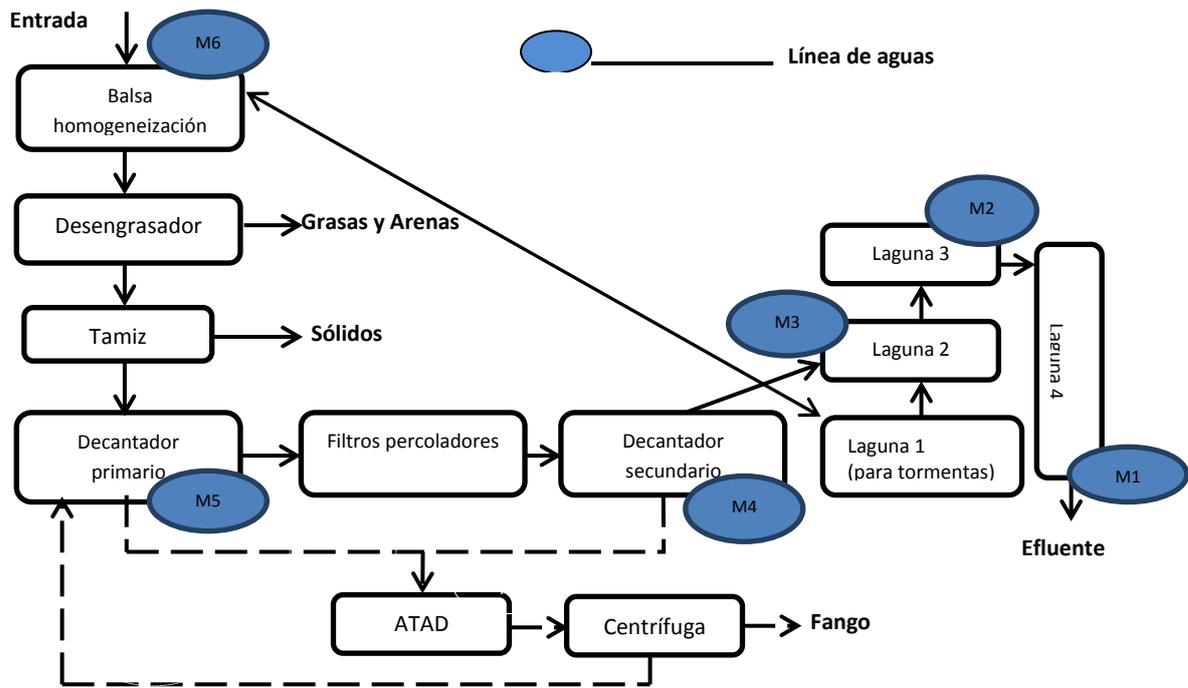


Figura 17. Localización de los puntos de muestreo en la EDAR A. Fuente: Elaboración propia

3.1.2. Puntos de muestreo EDAR B

La EDAR consta de un sistema de fangos activados.

Las muestras se tomaron el 15 de Diciembre del 2014, a la entrada y salida de cada una de las etapas de tratamiento que tienen lugar en la EDAR (Figura 18). Se tomaron muestras independientes en cada punto de muestreo para el análisis físico-químico y para el microbiológico. En total se recogieron 5 muestras líquidas o semilíquidas en recipientes estériles de 150ml para su posterior análisis microbiológico y 5 muestras de 500-1000ml en recipientes no estériles para el análisis de parámetros físico-químicos.

La Tabla 13 recoge las muestras tomadas en la línea de aguas:

Tabla 13. Descripción de los puntos e muestreo de la línea de aguas, EDAR B

MUESTRA	LÍNEA	TIPO MUESTRA	UBICACIÓN
M1	Agua	Agua	Entrada a la planta
M2	Agua	Agua fangosa	Salida reactor anóxico
M3	Agua	Agua fangosa	Salida reactor fangos
M4	Agua	Agua	Salida filtro
M5	Agua	Agua	Salida filtro + decantador

En la Figura 18 se observan los puntos de muestreo descritos en la Tabla 14:

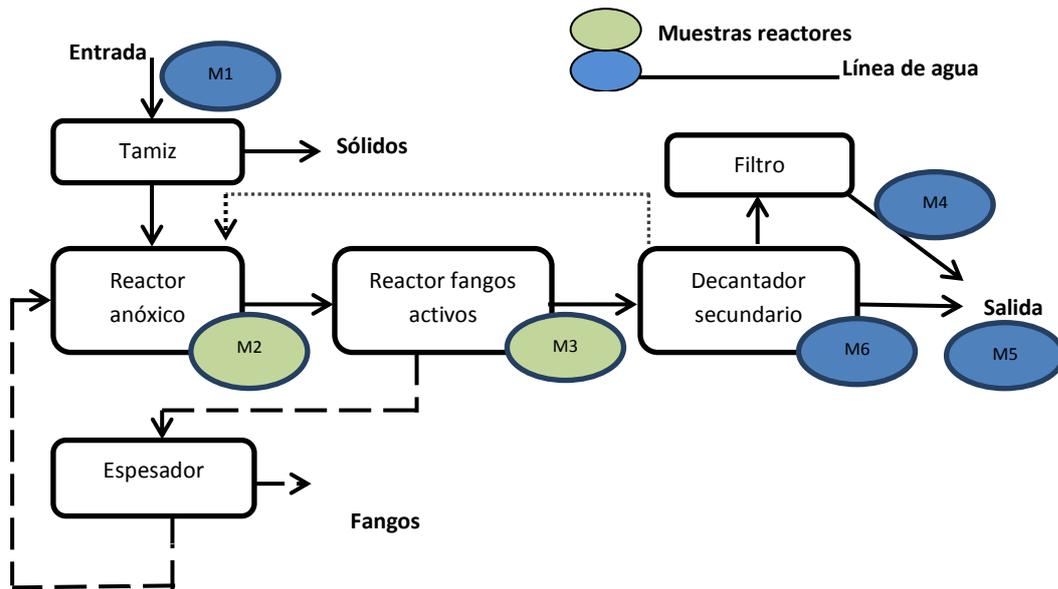


Figura 18. Localización de los puntos de muestreo en la EDAR B. Fuente: Elaboración propia

3.1.3. Puntos de muestreo EDAR C

La tecnología aplicada consiste en un proceso de lechos bacterianos. También cuenta con instalaciones para el tratamiento de fangos.

Las muestras se tomaron el 21 de Enero del 2015, a la entrada y salida de cada una de las etapas de tratamiento que tienen lugar en la EDAR (Figura 19). Se tomaron muestras independientes en cada punto de muestreo para el análisis físico-químico y para el microbiológico. En total se recogieron 7 muestras líquidas o semilíquidas en recipientes estériles de 150ml para su posterior análisis microbiológico y 7 muestras de 500-1000ml en recipientes no estériles para el análisis de parámetros físico-químicos.

La Tabla 14 recoge las muestras tomadas en la línea de aguas:

Tabla 14. Descripción de los puntos de muestreo de la línea de aguas, EDAR C

MUESTRA	LÍNEA	TIPO MUESTRA	UBICACIÓN
M1	Agua	Agua	Salida decantador secundario (efluente)
M2	Agua	Agua	Salida filtros baja carga
M3	Agua	Agua	Salida decantador intermedio
M4	Agua	Agua	Salida filtros alta carga
M5	Agua	Agua	Salida decantador primario
M6	Agua	Agua	Pretratamiento
M7	Agua	Agua	Entrada a la planta

En la Figura 19, se observan los puntos de muestreo descritos en la Tablas 16:

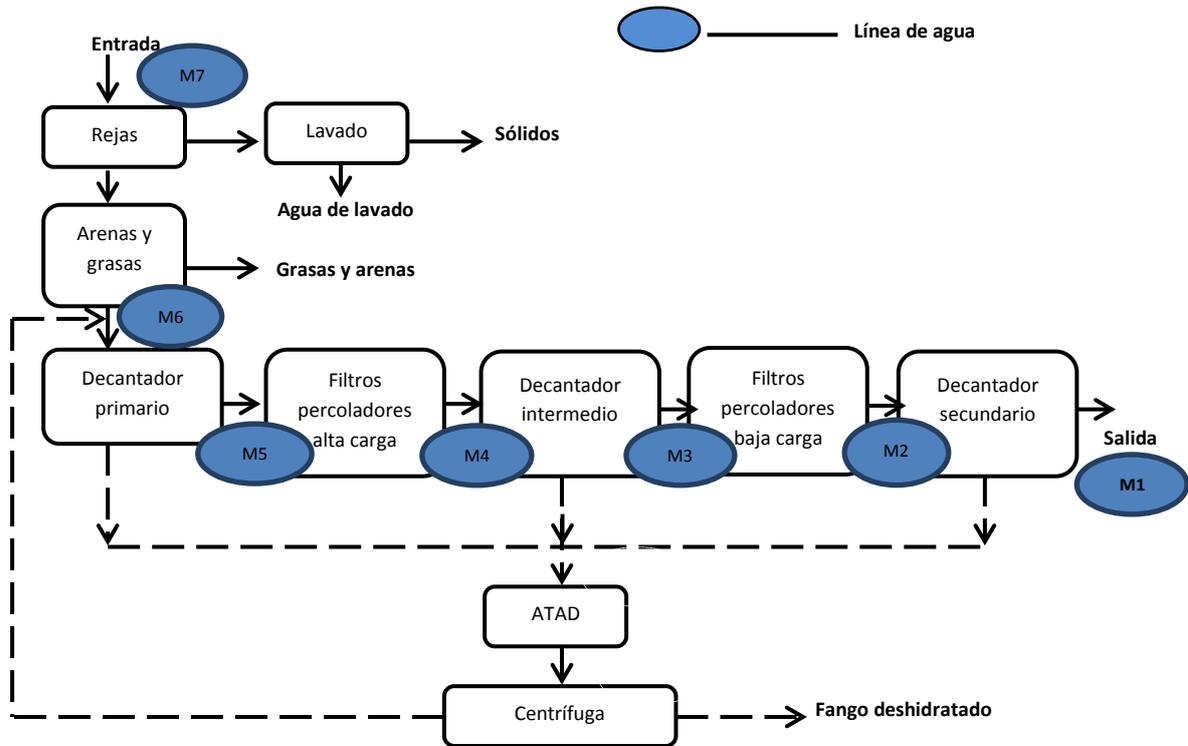


Figura 19. Localización de los puntos de muestreo de la EDAR C. Fuente: Elaboración propia

3.2. Metodología analítica

3.2.1 Parámetros físico-químicos

La caracterización físico-química de las aguas objeto de estudio comprende el análisis de los nutrientes, materia orgánica y sólidos presentes en ella a través de los siguientes parámetros:

- **pH:** es la forma de medir la concentración de iones hidrógeno de una disolución, indicando de ésta manera la acidez o basicidad de una sustancia. Su valor en aguas residuales urbanas oscila entre 6,5 y 8,5, fuera de éste rango se producen problemas en los procesos biológicos. Para su determinación se ha utilizado un kit de tiras indicadoras. De manera que, sumergiendo in situ dichas tiras en la muestra de agua, éstas sufren un cambio de color; color que posteriormente se compara con el patrón de coloración impreso en la caja con el fin de asignarles un pH.

Además, con el fin de confirmar los resultados obtenidos, una vez en el laboratorio se utiliza un pH-metro (CRISON GLP 21), en alguna de las muestras para así poder contrastar valores. La metodología empleada se basa en el método estándar 4500-H⁺ B (Eaton et al, 2005).

- **Conductividad/temperatura:** es la expresión numérica de la capacidad del agua de transportar corriente eléctrica. Su determinación es importante debido a que es indicador del grado de mineralización del agua y un parámetro de calidad. La medida se realiza in situ con

ayuda de un conductímetro portátil (HANNA HI 9033) en base a la UNE-EN 27888 (AENOR, 1994).

En cuanto a la temperatura, destacar su relevancia puesto que condiciona los procesos de depuración biológica (degradación de la materia orgánica y nitrificación) de manera que a medida que desciende, se ralentizan dichos procesos.

- **Oxígeno disuelto (OD)**: se trata de un parámetro que aporta información acerca de la contaminación del agua, o de lo bien que puede dar soporte este agua a la vida vegetal y animal, y el control del proceso de tratamientos de aguas residuales. El nivel de OD en aguas residuales depende de la actividad física, química y bioquímica del sistema de aguas. Su determinación se lleva a cabo in situ mediante un dispositivo portátil (HANNA 9146N) encargado de medir la concentración de oxígeno disuelto presente en la muestra (ppm) siguiendo el método establecido en la UNE-EN 25814:1994.

- **Turbidez**: es una expresión de la propiedad óptica originada por la dispersión y/o absorción de la luz en vez de su transmisión en línea recta a través de la muestra. Es decir, se trata de la reducción de transparencia obtenida como consecuencia de la presencia de materias sin disolver dispersas por la muestra. El método para determinar éste parámetro se basa en la UNE-EN ISO 7027 utilizando un turbidímetro/nefelómetro (HANNA LP2000). De ésta manera, como la cantidad de luz reflejada es proporcional a la cantidad de sólidos en suspensión, en función de la refracción obtenida se alcanza el resultado expresado en UNT (unidades nefelométricas de turbidez).

- **DQO**: es la cantidad de oxígeno necesaria para oxidar toda la materia orgánica y oxidable presente en un agua residual. Por tanto, se trata de una medida representativa de la contaminación orgánica de las muestras. Su determinación se ha lleva a cabo adaptando el método estándar 5220 D (Eaton et al, 2005), y utilizando un fotómetro multiparamétrico (HANNA 83099).

- **Carbono Orgánico Disuelto (COD)**: es un indicador de la materia orgánica presente en el agua residual puesto que su valor representa la cantidad de carbono producida suponiendo la oxidación total de la materia orgánica. Su determinación se ha lleva a cabo mediante un Analizador de COT (Shimadzu) y siguiendo el método estandarizado 5310 B (Eaton et al, 2005).

- **Fósforo**: se trata de un elemento esencial para el crecimiento biológico de modo que, su forma más asimilable (el ortofosfato) es utilizado como un parámetro de control en los procesos biológicos de eliminación de fósforo. Su determinación se ha llevado a cabo mediante un fotómetro multiparamétrico (HANNA 83099), y siguiendo el método estándar 4500-P D (Eaton et al, 2005), en un rango de 0-15 mg/L.

- **Nitrógeno amoniacal**: se produce por descomposición de la urea, compuesto siempre presente en las aguas residuales sanitarias, por hidrólisis enzimática. Dicho proceso es rápido, de manera que la urea raramente está presente en aguas residuales que no sean muy recientes. Por tanto, la edad de un agua residual puede medirse en función de la proporción de amoníaco presente. El procedimiento utilizado para su determinación está basado en el

método 4500 NH₃-C (Eaton et al, 2005) utilizando para ello un electrodo selectivo (CRISON GLP22).

- **Nitritos:** es un indicativo de contaminación de carácter fecal reciente (Catalán et al., 1971; Catalán, 1981; Metcalf y Eddy, 1995). El procedimiento utilizado para su determinación es una adaptación del método 4500-NO₂⁻ B (Eaton et al, 2005), utilizando para ello un fotómetro multiparamétrico (HANNAH 83099).

- **Nitratos:** el predominio de ésta forma en un agua residual es indicador de que el residuo se ha estabilizado con respecto a la demanda de oxígeno. La metodología utilizada para su determinación se basa en el método 4500-NO₃⁻ B o C (Eaton et al, 2005), utilizando para ello un fotómetro multiparamétrico (HANNAH 83099).

- **Sólidos en suspensión:** son aquellos que se encuentran en el agua sin estar disueltos en ella, pueden ser sedimentables o no y se trata de un indicador de la turbidez de la muestra. El procedimiento utilizado para su determinación está basado en el método estandarizado 2540 D (Eaton et al, 2005).

- **Sólidos en suspensión volátiles:** son un indicador del contenido orgánico de los residuos suspendidos en la muestra puesto que las cenizas que quedan en el filtro tras su calcinación corresponden a la parte inorgánica. También proporcionan una medida de la población microbiana activa en los procesos biológicos (Henry y Heinke, 1999). Su determinación se ha llevado a cabo siguiendo el método estandarizado SM 2540 E (Eaton et al, 2005).

- **Sólidos totales:** su determinación permite estimar la cantidad de materia disuelta y en suspensión presente en la muestra. En esta ocasión, dicho parámetro se calculará sólo para agua fangosa o fangos. En el caso de los fangos, permite conocer de manera exacta la humedad o la cantidad de agua que contiene. La metodología utilizada se basa en el método estandarizado 2540 G (Eaton et al, 2005).

A modo de síntesis, la metodología utilizada para la caracterización físico-química queda recogida en la Tabla 15 y el procedimiento de todos los parámetros analizados están en el Anexo I:

Tabla 15. Metodología analítica de parámetros físico-químicos

PARÁMETRO	INSTRUMENTO	RANGO MEDIDA	ERROR	MÉTODO
pH	Kit pH	2 - 16	≤ 0,02	Método estándar 4500H ⁺ -B
Conductividad	Conductímetro Hanna HI 9033 Multirange	0,01-19.999µs/cm	≤ 0,5 µs /cm	Noma UNE-EN 27888
O ₂ disuelto (temperatura)	OxímetroThermoOrion 805 A Plus	0-45 ppm 0-50°C	± 1% ±0,2°C	Norma UNE-EN 25814
Turbidez	Turbidímetro Hanna	00 – 1000 NTU	0,2 NTU	UNE-EN ISO 7027
DQO	Fotómetro multiparamétrico Hanna	R.B 0 - 150mg/L R.M 0-1500mg/L R.A 0-15000mg/L	R. Bajo ± 1 mg/L R. Medio ± 1mg/L R. Alto ± 10mg/L	Método estándar 5220 D
COD	Analizador de COT Shimadzu	TC:0 - 25000 mg/L IC: 0 - 30000 mg/L	5-10 %	Método estándar 5310 B

Tabla 15: Metodología analítica de parámetros físico-químicos (continuación)

PARÁMETRO	INSTRUMENTO	RANGO MEDIDA	ERROR	MÉTODO
Fósforo total	Fotómetro multiparamétrico Hanna	0 – 15 mg/L	± 0,2 mg/L	Método estándar 4500-P D
Nitritos	Fotómetro multiparamétrico Hanna	0 – 150 mg/L	± 1 mg/L	Método estándar 4500-NO ₂ - B
Nitratos	Fotómetro multiparamétrico Hanna	0 – 30 mg/L	± 0,1 mg/L	Método estándar 4500-NO ₃ - B
Nitrógeno amoniacal	Electrodo selectivo	1-1000 mg/L	5%	Método estándar 4500 NH ₃ -C
Sólidos suspensión	-	-	-	Método estándar 2540 D
SS volátiles	-	-	-	Método estándar 2540 E
Sólidos totales	-	-	-	Método estándar 2540 G

Legenda: R.B.: Rango Bajo
 R.M.: Rango Medio
 R.M.: Rango Alto

TC: Carbono total
 IC: Carbono inorgánico

3.2.1 Parámetros microbiológicos

La caracterización microbiológica de las aguas objeto de estudio comprende el análisis de los siguientes agentes patógenos: coliformes totales, *Escherichia coli*, *Enterococcus faecalis* y huevos de nematodos.

3.2.1.1. Análisis de Coliformes totales y *Escherichia coli*

Las Coliformes totales pertenecen a la familia *Enterobacteriaceae* y se caracterizan por su capacidad para fermentar la lactosa con producción de ácido y gas. Son bacilos gramnegativos, aerobios y anaerobios facultativos, no esporulados. Se encuentran en el intestino del hombre y de los animales, pero también en otros ambientes: agua, suelo, plantas, cáscara de huevo, etc.

La presencia de coliformes en el agua indica contaminación bacteriana y en aguas tratadas, funcionan como un alerta de que hubo contaminación, sin identificar el origen. Cabe destacar que algunos coliformes son capaces de multiplicarse en el agua (Madigan et. al, 1997).

La *Escherichia coli* es una bacteria aerobia gramnegativa perteneciente al grupo coliforme. Reside en el colon de los seres humanos y de otros animales de sangre caliente. Suele utilizarse como indicador en el análisis de aguas para determinar si existe contaminación fecal. Algunas cepas producen gastroenteritis o infecciones de las vías urinarias.

El cultivo y recuento de Coliformes totales y *Escherichia coli* se realizó siguiendo el procedimiento descrito en la Norma Española UNE-EN ISO 16649-2: “Método horizontal para la enumeración de *Escherichia coli* beta-glucuronidasa positivo”, y el método estandarizado 9215C: “Método de placa difusa” (Eaton et al, 2005).

La Norma UNE establece el medio de cultivo empleado, así como las diluciones necesarias para realizar la siembra, la incubación de ésta y el posterior recuento. Por otro lado, el método estandarizado marca el modo de llevar a cabo la siembra.

A continuación se explican detalladamente los pasos necesarios para realizar el análisis.

- Medios de cultivo

Un medio de cultivo es un material nutritivo artificial preparado para el crecimiento de microorganismos en un laboratorio. A la hora de cultivar una bacteria determinada y para que ésta crezca adecuadamente, el medio de cultivo debe reunir una serie de condiciones: contener humedad suficiente, un pH ajustado y una concentración conveniente de oxígeno. Además debe contener los nutrientes y factores de crecimiento necesarios y debe ser estéril, es decir, estar exento de todo microorganismo contaminante. Por último, una vez que el medio de cultivo sea sembrado, debe incubarse a la temperatura adecuada (Tortora et al, 2007).

En función de la consistencia del medio se pueden encontrar en estado líquido, sólido o semisólido. Los medios sólidos, que son los utilizados en este trabajo, se presentan en forma de polvo fino o granular. Para su reconstitución, se suspende la cantidad precisa de polvo en agua destilada y se lleva a ebullición. Posteriormente, se esteriliza durante 15 minutos a una temperatura de 121 °C en el autoclave. Tras finalizar el proceso de autoclavado, los frascos con el agar líquido se colocan en el baño termostático a 50 °C y se mantienen hasta su utilización. Si el medio de cultivo preparado no se utiliza inmediatamente, se guarda refrigerado y etiquetado durante un periodo no superior a un mes.

El medio utilizado para el cultivo de Coliformes totales y *Escherichia coli* es el agar selectivo Chromogenic Coliform Agar (CCA) (Scharlau). Se trata de un material nutritivo cromogénico selectivo que permite el recuento simultáneo y específico de ambas bacterias.

- Diluciones decimales seriadas

El volumen de muestra a analizar depende de la concentración bacteriana de la muestra. Como de antemano se desconoce dicha concentración microbiológica, se realizan diluciones de la muestra inicial. Por tanto, la finalidad de dichas diluciones reside en obtener un número de colonias en cada medio adecuado para el recuento y la reproducibilidad de los microorganismos.

El procedimiento consiste en tomar 1 mL de cada una de las muestras (dilución 0) y transferirlo a un tubo con 9 mL de agua destilada. A continuación se homogeneiza con ayuda de un vortex obteniendo así la dilución 1:10 (dilución -1). Para hacer las diluciones sucesivas, se toma 1 mL de la dilución precedente correctamente homogeneizada y se traspasa a un tubo con 9 mL de agua destilada. Destacar que debe realizarse en un ambiente de trabajo estéril proporcionado con un mechero Bunsen.

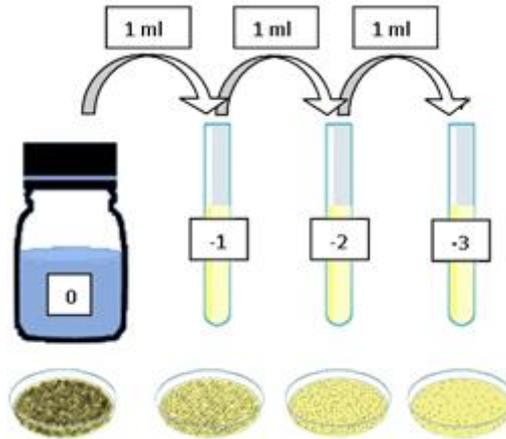


Figura 20. Esquema del método de diluciones seriadas. Fuente: Banco de imágenes del IFSTIC

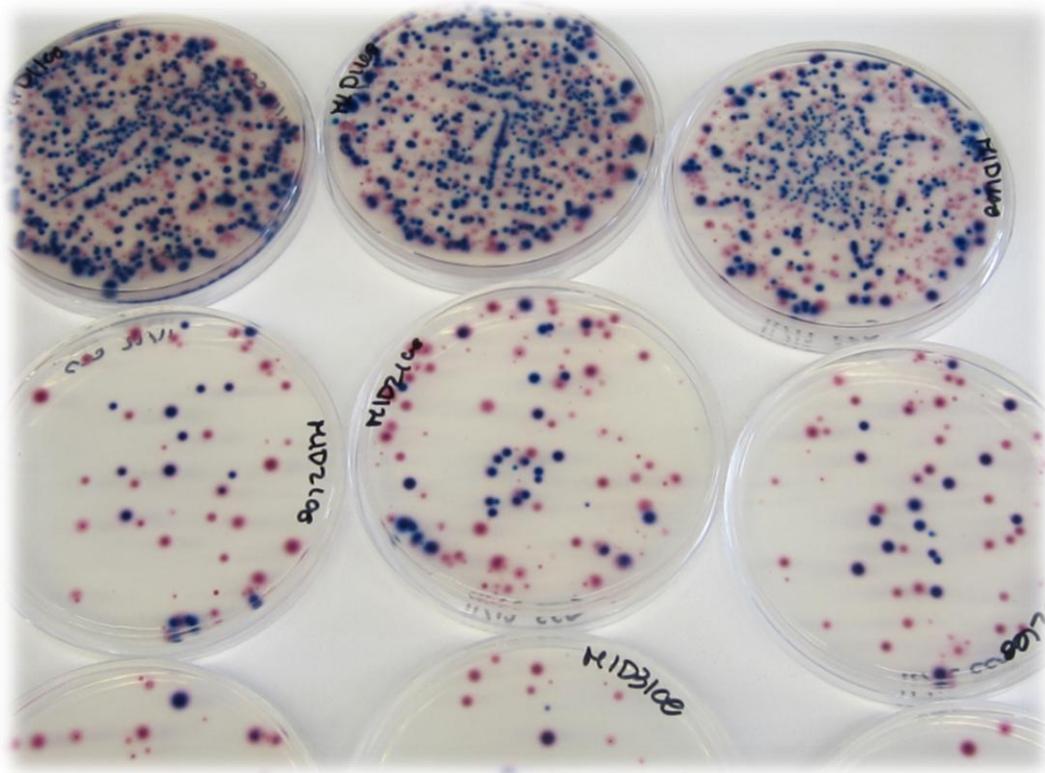


Figura 21. Aspecto de las placas Petri después de la siembra en superficie de las diluciones decimales de una muestra de agua (de la más concentrada 0 a la más diluida -3). Fuente: Elaboración propia

La Figura 20 y 21 reflejan el procedimiento de diluciones decimales seriadas de manera gráfica. Además muestra el aspecto de las placas Petri después de la siembra de las diluciones decimales de una muestra (de la más concentrada 0 a la más diluida -3).

○ Métodos de siembra

En el desarrollo del análisis se ha utilizado el método de siembra en superficie. Consiste en colocar un pequeño volumen conocido de muestra (100 µL) en el centro de una placa de medio sólido mediante una pipeta. A continuación, con ayuda de una varilla de vidrio estéril, se extiende la muestra uniformemente describiendo círculos por la superficie del agar hasta

notar que la muestra ha sido absorbida por el medio. Este método se utiliza cuando se estima que la concentración bacteriana es elevada.

Con el fin de obtener un número de colonias adecuado para el recuento y la reproducibilidad de los microorganismos, la siembra se llevaba a cabo de la siguiente manera: se preparan un total de 9 placas de Petri para cada muestra. Para ello se pipetea 100 µL de cada una de las diluciones decimales preparadas anteriormente (de la más concentrada -1 a la más diluida -3) y se repite dicho procedimiento 3 veces, obteniendo así un triplicado de cada una de las siembras realizadas.

- Incubación

El periodo de incubación es el intervalo temporal que transcurre entre la infección inicial y la primera aparición de cualquier signo o síntoma (Tortora et al., 2007). Es decir, el tiempo que pasa entre la inoculación y la primera aparición de las bacterias en el medio de cultivo.

En este caso la incubación se realiza en una estufa de cultivo a una temperatura de 37°C durante un periodo comprendido entre las 18 y las 24 horas. Es importante cumplir dichas condiciones puesto que son las óptimas para que los microorganismos se desarrollen adecuadamente.

- Recuento

El recuento en placa se basa en la suposición de que cada bacteria crece y se divide para producir una sola colonia. Esto no siempre es cierto porque las bacterias con frecuencia crecen unidas en cadena o agrupadas. Por consiguiente, a menudo una colonia no se produce como resultado de una única bacteria. Para reflejar esta realidad los recuentos en placa se indican como unidades formadoras de colonias (UFC) (Tortora et al., 2007). Los datos de cada experimento realizado se expresan en UFC·100 mL⁻¹.

Tras finalizar el periodo de incubación, en el caso de las coliformes totales y *Echerichia coli*, se cuentan todas las colonias que presentan una coloración morada y azul oscuro respectivamente.

Es importante que el número de colonias que aparecen en las placas no sea demasiado grande, pues algunas colonias se pueden fusionar dando estimaciones erróneas. También se debe evitar que el número de colonias sea demasiado bajo para que sea significativo (Madigan et al., 2003). Por esta razón se diluye la muestra en diferentes concentraciones, tal y como se explica en el apartado de diluciones seriadas decimales. En el método de siembra en superficie se cuentan las placas con un número de colonias entre 30 y 300 (Eaton et al., 2005).

Tras seleccionar las placas con crecimiento adecuado, el recuento bacteriano se obtiene aplicando la siguiente ecuación, donde F_d es el factor de dilución, es decir, la inversa de la dilución seleccionada.

$$\frac{\text{UFC}}{100\text{mL}} = \frac{\text{UFC}}{\text{mL muestra filtrado}} \cdot 100\text{mL} \cdot F_d$$

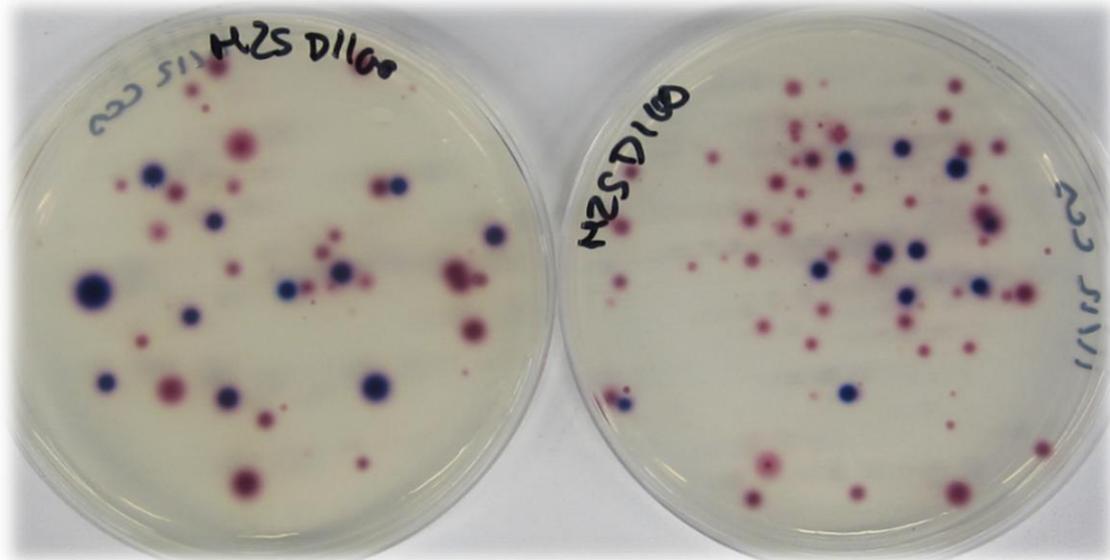


Figura 22. Colonias de Coliformes totales y *Echerichia coli* de la Muestra 2, EDAR B. Fuente: Elaboración propia

3.2.1.2. Análisis de *Enterococcus faecalis*

Es una bacteria Gram-positiva que habita el tracto gastrointestinal de animales de sangre caliente. Es inmóvil, anaerobia facultativa y fermenta la glucosa sin producir gas.

E. faecalis puede vivir en ambientes extremos que incluyen pH altamente alcalino y elevadas concentraciones de sal. Debido a su resistencia a estos factores, si permiten un mayor tiempo de supervivencia son considerados como indicadores de contaminación fecal antigua en contraste con la presencia de coliformes que indican contaminación fecal reciente (Tortora et al, 2007).

El cultivo y recuento de *Enterococcus faecalis* se realizó siguiendo el procedimiento descrito en la Norma Española UNE-EN ISO 7899:2001: “*Detección y recuento de enterococos intestinales*”, y en el método estandarizado 9215C: “*Método de placa difusa*” (Eaton et al, 2005).

Nuevamente, la Norma UNE establece el medio de cultivo empleado, las diluciones, la incubación y el posterior recuento. Y el método estandarizado marca el modo utilizado en la siembra de la muestra.

A continuación se explican detalladamente los pasos realizados en el análisis.

- Medios de cultivo

El medio utilizado para el cultivo de *Enterococcus faecalis* es el agar selectivo Slanetz & Bartley (Scharlau). La preparación de este agar conlleva después de su esterilización y enfriamiento a 50 °C, la adición de cloruro de 2,3,5-trifeniltetrazolio (TTC) en una proporción de 10 mL por cada litro de medio preparado. La solución TTC se utiliza como indicador de color. Esta solución indica la actividad biológica de los enterococos, ya que el cloruro de 2,3,5-

trifeniltetrazolio (incoloro) se reduce a trifenilformazán (rojo), de manera que las colonias adquieren un color granate característico.

La composición del medio de cultivo se detalla en la Tabla 16 (Scharlau):

Tabla 16. Composición del medio de cultivo Slanetz & Bartley

INGREDIENTES	CONCENTRACIÓN (g/L)
Triptosa	20,0
Extracto de levadura	5,0
Glucosa	2,0
Hidrogenofosfato de dipotasio	4,0
Azida de sodio (NaN ₃)	0,4
Cloruro de trifeniletetrazolio	0,1
Agar	10

- Diluciones decimales seriadas

Con el fin de utilizar un volumen de muestra adecuado para la reproducibilidad y el posterior recuento de las colonias, se realizan diluciones decimales seriadas. El procedimiento llevado a cabo es el mismo que el utilizado en el caso de coliformes totales y *Echerichia Coli*, explicado anteriormente.

- Métodos de siembra

El método utilizado para la siembra de *Enterococcus faecalis* es el mismo que en el caso anterior, siembra en superficie. Los pasos a seguir son idénticos y se detallan en apartados anteriores.

- Incubación

Una vez sembradas las placas, se invertían e introducían en la estufa incubadora a 37 °C durante un intervalo de tiempo comprendido entre las 40 y las 48 horas.

- Recuento

Tras finalizar el periodo de incubación y seleccionar las placas con crecimiento adecuado, se cuentan todas las colonias que presentan una coloración granate. Por último, el recuento bacteriano (UFC/100 mL) se obtiene aplicando la misma ecuación que para la Coliformes totales.

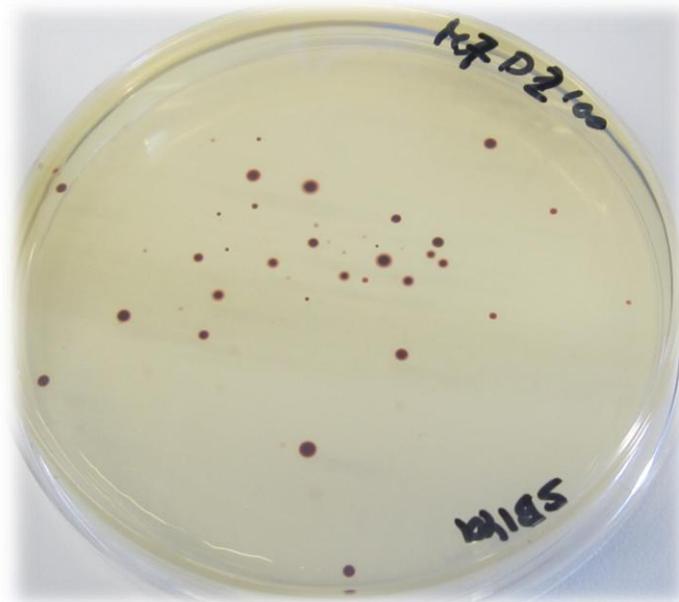


Figura 23. Colonias de *Enterococcus faecalis* de la Muestra 7, EDAR A. Fuente: Elaboración propia

3.2.1.3. Análisis de Huevos de nemátodos

Los nemátodos, vulgarmente conocidos como gusanos redondos debido a su morfología, son animales invertebrados de cuerpo alargado con simetría bilateral y órganos definidos, con reproducción sexuada y tamaño variable. Se reproducen formando huevos fértiles.

Los huevos están compuestos por una a tres membranas: a-interna, en su mayor parte glucolípidos y pocas proteínas, b-media, casi siempre quitinosa, se secreta en estímulo a la fertilización y c- externa, vitelina, compuesta de proteínas. En la parte interna del huevo se encuentra el blastómero que en condiciones de temperatura, pH, CO₂ y potencial de oxidorreducción, eclosionan dando origen al primer estadio larval.

La identificación y recuento de dicho parámetro en la caracterización de aguas residuales resulta imprescindible a la hora de cumplir los criterios de calidad de las aguas de reutilización recogidos en el RD 1620/2007.

El análisis parasitológico se ha realizado empleando un método difásico de sedimentación/flotación (Ayes y Mara, 1996) basado en la técnica de examen coprológico de Bailenger (1979), metodología propuesta por la OMS y recomendada como método de recuento por el RD 1620/2007.

- Método de determinación

Las muestras, 10 litros para cada efluente analizado, una vez en el laboratorio, se someten a un proceso de sedimentación en un recipiente abierto de paredes rectas durante 24 horas. De esta manera se elimina el 90% de sobrenadante mediante una bomba de succión. A

continuación, una vez bien lavado el contenedor con agua destilada, el sedimento es transferido a tubos de centrifuga y centrifugado a 1000 rpm durante 15 minutos. Tras la centrifuga, se elimina el sobrenadante y el sedimento obtenido se resuspende en un volumen de solución tampón acetato-acético de pH 4,5. A continuación se añade un volumen de éter dietílico igual al doble del volumen del sedimento obtenido y se agita vigorosamente con ayuda de un vortex para seguidamente centrifugar nuevamente la mezcla a 1000 rpm durante 15 minutos. De éste modo se obtiene una distribución en tres fases (fase etérea superior, tapón intermedio sólido y fase acuosa inferior) y sedimento sólido. Las fases superiores se eliminan conservando el sedimento, donde están concentrados los huevos de nematodos. Finalmente se centrifuga de nuevo durante 5 min, se extrae el sobrenadante y se resuspende el sedimento en cinco volúmenes de sulfato de zinc al 33%.

Tras homogeneizar la mezclar, se retiran alícuotas de 0.05 ml a una cámara McMaster, cubriéndose con cubreobjetos y examinando toda la preparación al microscopio con un objetivo de 20x, utilizándose el de 40x para confirmar. Destacar que las alícuotas se dejan reposar durante 5 min sobre el portaobjetos para favorecer la flotación de los huevos antes de su examen.

Como en sta ocasión, debido al criterio establecido por el RD 1620/2007, el objetivo es determinar la presencia o ausencia de huevos de nematodos en el efluente de las EDAR, no fue necesario calcular la concentración.

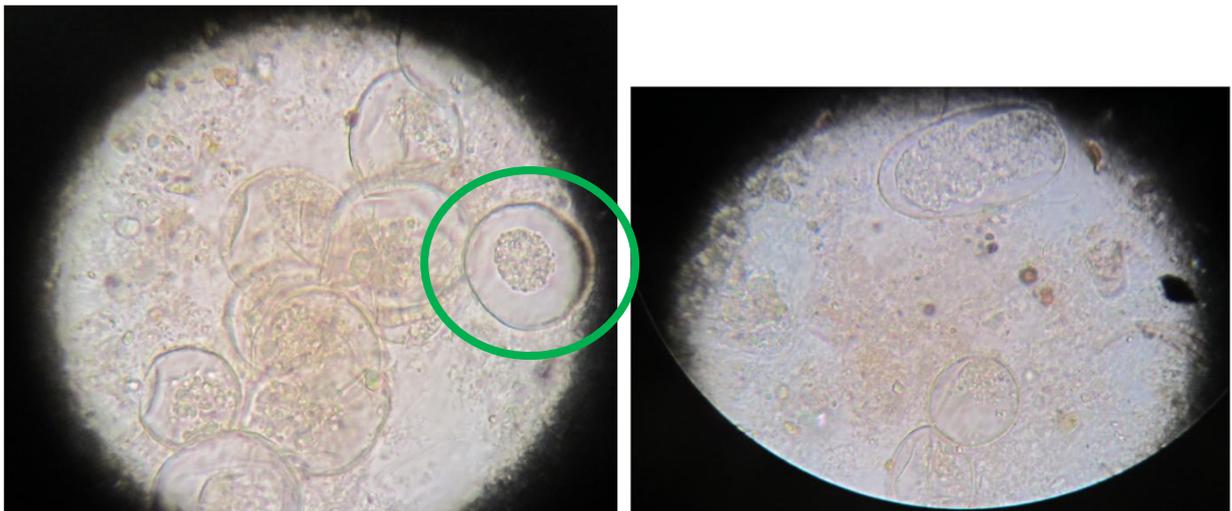


Figura 24.Huevos de nematodos vistos por microscopio. Fuente: Elaboración propia

A modo de síntesis, la metodología utilizada para la caracterización microbiológica queda recogida en la Tabla 17:

Tabla 17. Metodología analítica de parámetros microbiológicos

PARÁMETRO	MÉTODO	MEDIO CULTIVO	TEMPERATURA Y TIEMPO DE INCUBACIÓN
Coliformes totales	UNE ISO 16649-2 Método estándar 9215C	Chromogenic Coliform Agar	37°C/18-24h
<i>Escherichia coli</i>	UNE ISO 16649-2 Método estándar 9215C	Chromogenic Coliform Agar	37°C/18-24h
<i>Enterococcus faecalis</i>	UNE EN ISO 7899:2001 Método estándar 9215C	Slanetz&Bartley Agar	37°C/40-48h
Huevos de nemátodos	Método Bailenger (OMS)	-	-

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Uno de los objetivos específicos de este Trabajo Fin de Grado consiste en realizar el estudio de la evolución de diferentes contaminantes a lo largo de la línea de aguas de tres EDAR pertenecientes a la cuenca del Ebro.

Los siguientes gráficos muestran los parámetros medidos en el análisis de las muestras, dividiéndolos en cinco grupos en función de su naturaleza. Los resultados completos se detallan en el Anexo II.

4.1. EDAR A

- Evolución de los parámetros medidos in situ: pH, oxígeno disuelto, temperatura y conductividad.

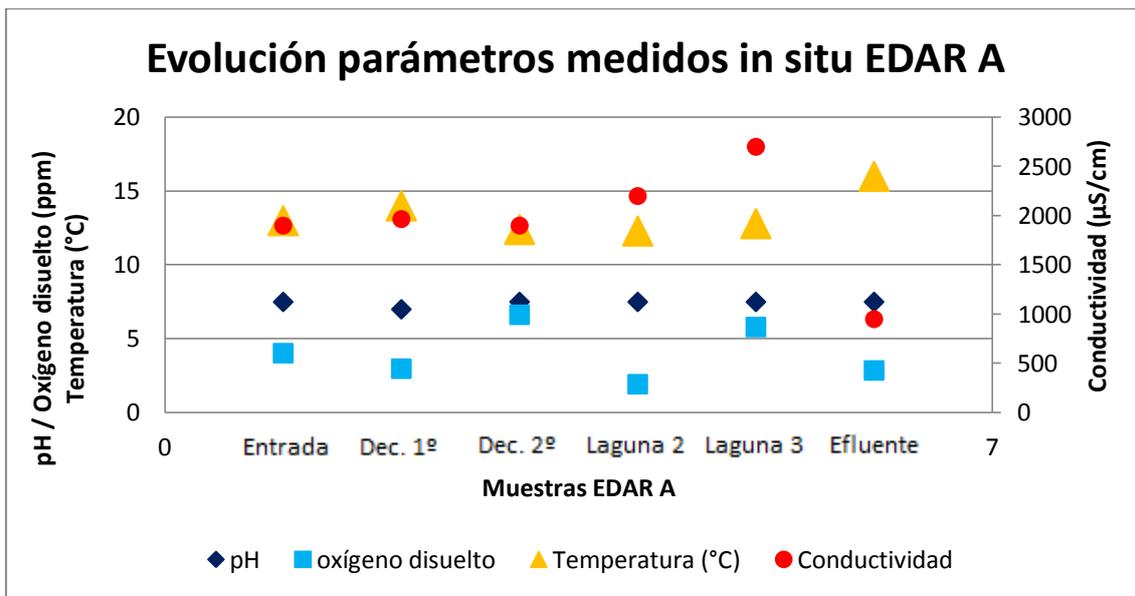


Figura 25. Evolución de los parámetros medidos in situ de la EDAR A. Fuente: Elaboración propia

Tal y como se observa en la Figura 25, las tendencias de los diferentes parámetros a lo largo de la línea de aguas varía. Destacar los siguientes aspectos: las oscilaciones del oxígeno disuelto presente en las aguas residuales se deben a las diferentes etapas de depuración. Se observa un pequeño aumento tras la decantación secundaria, después de haber sido sometida a un proceso de filtros percoladores, donde es necesaria la presencia de oxígeno para el desarrollo bacteriano (Metcalf and Eddy, 1995). A continuación se produce un descenso, a la salida de la laguna 2, como consecuencia de la eliminación de la materia orgánica durante el tratamiento biológico anterior y el consecuente consumo de oxígeno que implica. Por último, hay un leve crecimiento en la laguna 3 como consecuencia del recrecimiento poblacional de algas gracias a los nutrientes y la clarificación de las aguas, aumentando así las reacciones fotosintéticas.

Por otro lado, la conductividad permanece constante a lo largo de la línea de aguas y sufre una disminución tras el paso por las lagunas debido a la disminución de sales en forma de sólidos en suspensión y disueltos.

El pH permanece prácticamente constante a lo largo del proceso de depuración puesto que en ninguna de las etapas es necesario realizar un ajuste de pH que pueda modificar dicha tendencia. Lo mismo sucede con la temperatura, que se mantiene en la misma línea durante todo el tratamiento, sufriendo una leve subida al final, tras la laguna 3. Este aumento corresponde con la salida del sistema de lagunas y es consecuencia del elevado tiempo de retención que requiere dicho tratamiento. De manera que al permanecer el agua estancada y expuesta al sol, la temperatura va aumentando.

- Evolución de la materia orgánica: DQO y COD

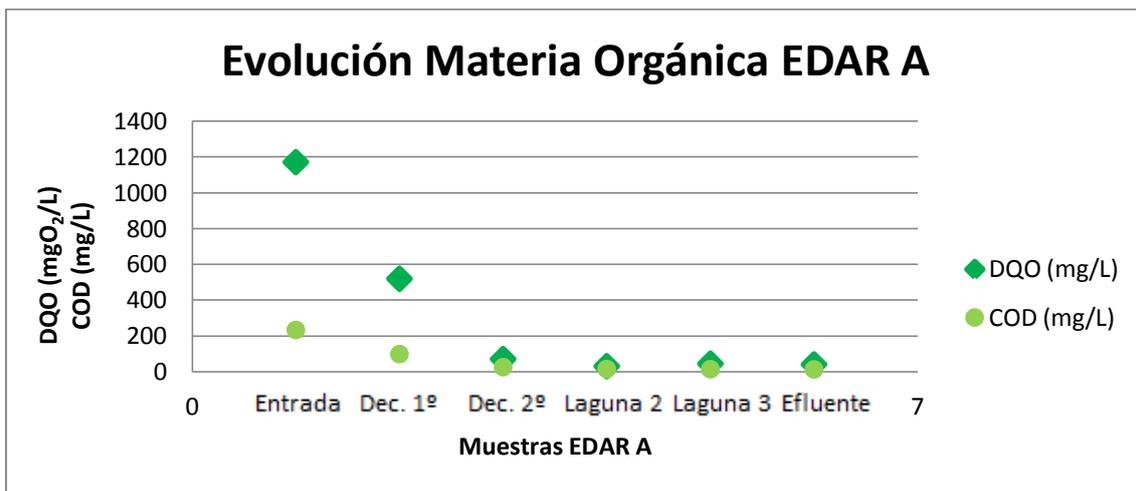


Figura 26. Evolución de la materia orgánica de la EDAR A. Fuente: Elaboración propia

Tanto la DQO como el COD son indicadores directos de la cantidad de materia orgánica presente en el agua residual. Se observa una brusca bajada como consecuencia de la decantación primaria, donde se elimina gran parte de los sólidos en suspensión. Tras el tratamiento de lechos bacterianos, tratamiento biológico enfocado a eliminar materia orgánica, hay una nueva y notable disminución. A partir de este punto la concentración de materia orgánica se estabiliza en valores bajos y constantes.

- Evolución de los sólidos en suspensión y la turbidez

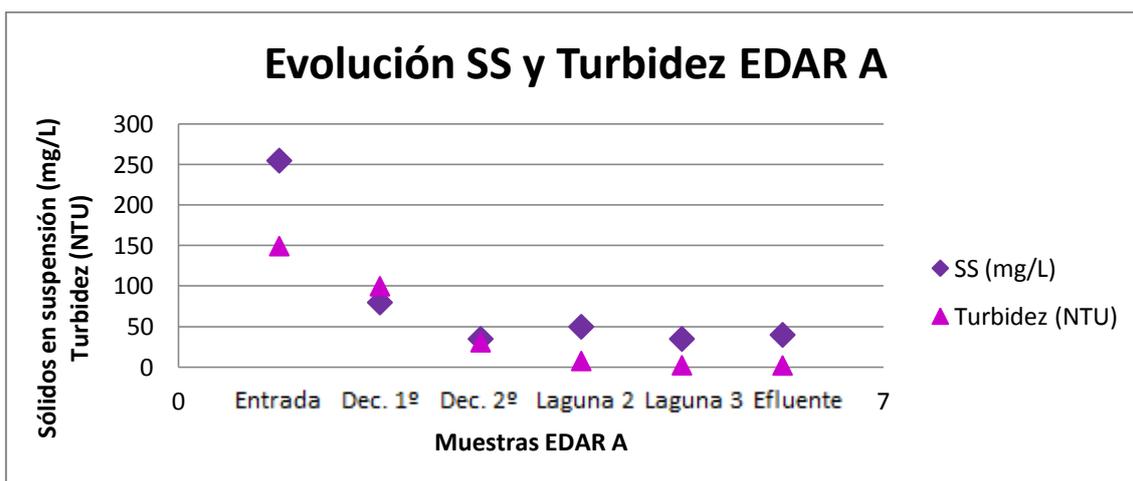


Figura 27. Evolución de los sólidos en suspensión y la turbidez de la EDAR A. Fuente: Elaboración propia

Ambos parámetros tienen relación directa con la presencia de sólidos en el efluente, es por ello que la tendencia seguida a lo largo de la línea de tratamiento, es prácticamente la misma.

Tras el tratamiento primario se produce una notable disminución de sólidos en suspensión y turbidez en el agua residual urbana como consecuencia de la decantación primaria, además de que previamente durante el pretratamiento, donde un sistema de rejillas y tamices seguido de un desarenador-desengrasador, se ha eliminado parte de la carga contaminante del agua de entrada a la planta.

Tras el tratamiento secundario formado por un sistema de lechos bacterianos seguido de un decantador secundario, se observa una nueva bajada. Es debido a la acción de los microorganismos encargados de la degradación de la materia orgánica presente en el agua residual y la posterior clarificación, donde los fangos biológicos generados caen al fondo eliminando así sólidos en suspensión y pequeñas partículas suspendidas responsables de la turbidez (Trapote, 2011). A partir de este punto, debido a las lagunas de maduración y el consecuente elevado tiempo de retención del agua en ellas, se observa una leve clarificación del caudal manteniendo así los valores de sólidos en suspensión y turbidez prácticamente constantes.

- Evolución de los nutrientes: fósforo, nitritos, nitratos y nitrógeno amoniacal

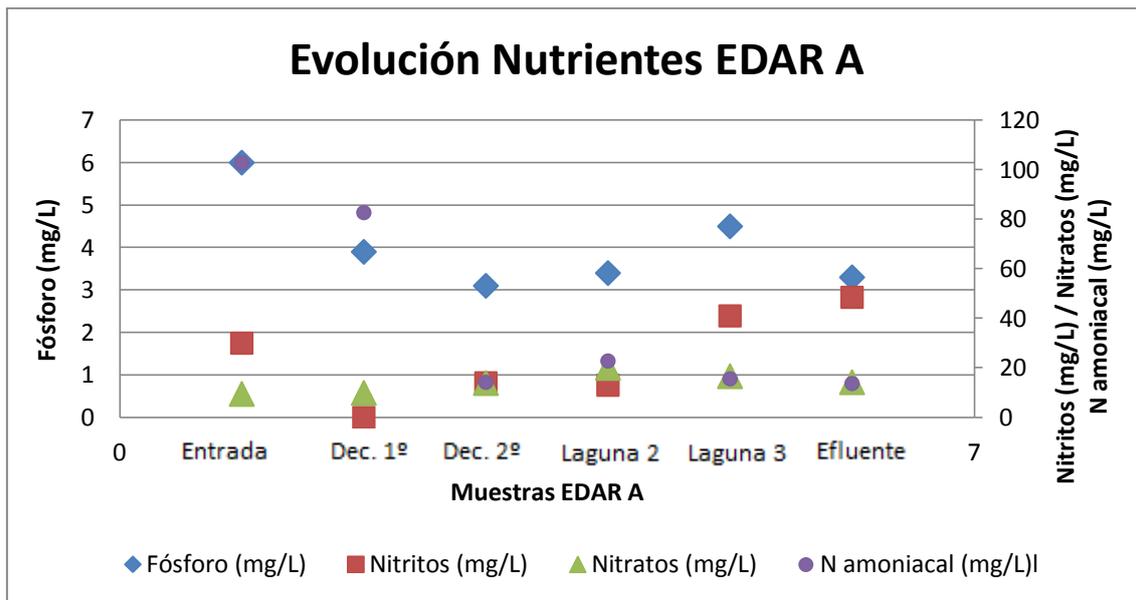


Figura 28. Evolución de los nutrientes analizados de la EDAR A. Fuente: Elaboración propia

Tanto el fósforo como el nitrógeno son nutrientes necesarios para el correcto funcionamiento del tratamiento biológico de la EDAR puesto que sirven de alimento a los microorganismos encargados de descomponer la materia orgánica presente en el agua residual urbana. Por ello, tras el decantador secundario hay drástica disminución en la concentración de fósforo. A partir de esta etapa, los valores permanecen bajos y prácticamente constantes.

Por otro lado, el nitrógeno tiene altibajos a lo largo de todo el tratamiento debido a los procesos de oxidación y su consecuente cambio de forma.

En el caso del nitrógeno amoniacal, como consecuencia del tratamiento de lechos bacterianos y por lo tanto de la labor de los microorganismos encargados de eliminar la materia orgánica, se observa una importante disminución de su concentración. Además, se observa que en el momento que disminuye la concentración de nitrógeno amoniacal, se genera un aumento de nitritos. Esto se debe al sistema de lagunaje, tratamiento adicional encargado, entre otras cosas, de la oxidación del nitrógeno amoniacal a nitrito en condiciones aerobias. Por ello los nitritos aumentan conforme el agua pasa por las lagunas.

En cuanto a los nitratos, permanecen prácticamente constantes a lo largo de la línea de tratamiento de la EDAR. Es debido a la buena oxigenación de la planta, de manera que las necesidades de este elemento no necesitan ser solventadas por el oxígeno disponible en la molécula de nitrato.

Destacar que tras la decantación primaria se observa una leve bajada en la concentración de todos los nutrientes. Este hecho puede ser consecuencia de la balsa de homogeneización previa al decantador, donde además de regular los caudales de entrada a la planta de tratamiento, tienen lugar reacciones que suponen una disminución del fósforo y el nitrógeno presente en las aguas residuales urbanas.

- Evolución microbiológica: coliformes totales, *Escherichia coli*, enterococos y huevos de nemátodos.

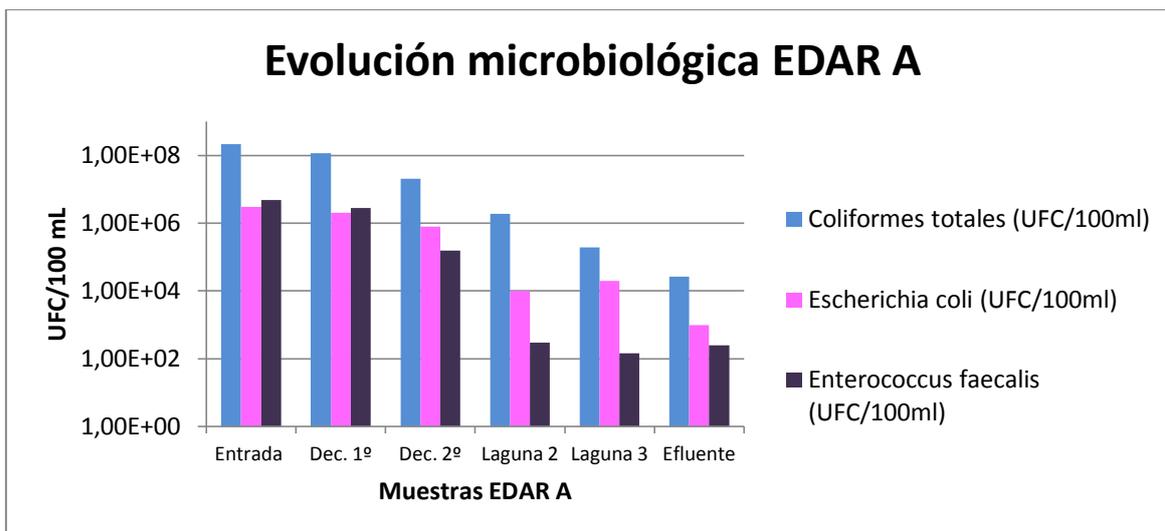


Figura 29. Evolución de los parámetros microbiológicos analizados de la EDAR A. Fuente: Elaboración propia

La variación de los microorganismos a lo largo de la línea de aguas ha sido constante teniendo su reducción más notable tras el proceso de lechos bacterianos y principalmente durante el sistema de lagunajes.

Tras el tratamiento biológico de lechos bacterianos, debido a la agrupación de los microorganismos sobre las superficies que hacen de soporte del biofilm y su constante engrosamiento que acaba por decantar por la falta de oxígeno de las capas inferiores, provoca que parte de los agentes patógenos analizados sean arrastrados al decantador secundario a través de los fangos biológicos generados; disminuyendo así la concentración de estos en el agua residual urbana.

Por otro lado, el descenso producido en las lagunas de maduración es debido a que la transparencia del agua llega hasta el fondo, permitiendo así la completa penetración de la luz solar. Por lo tanto se combinan los efectos de la luz, y por tanto su acción desinfectante de manera natural a través de la radiación ultravioleta, con los factores generados por las altas tasas fotosintéticas (elevada producción de O₂, altos valores de pH, presencia de toxinas, escasez de nutrientes), provocando así condiciones y efectos adversos para los microorganismos.

En contraposición, el pretratamiento y la decantación primaria no suponen ninguna variación en la concentración de estas bacterias. Al tratarse de tratamientos exclusivamente físicos, no afecta a los seres vivos ni positiva ni negativamente.

La concentración de todos los agentes patógenos analizados se reduce una media de 10³ a lo largo del proceso de depuración.

El grupo de microorganismos que presenta mayor concentración es el de coliformes totales puesto que abarca bacterias de diferente género, alguno de ellos indicadores de contaminación fecal presente en las aguas residuales urbanas, como la *Escherichia coli*.

Además de la *Escherichia coli*, se han analizado los *enterococcus faecalis*, que a pesar de pertenecer a otra familia, también son indicadores de contaminación fecal en el agua. Es por ello que conforme se avanza a lo largo de la línea de tratamiento, se observa como la disminución de la concentración de los tres microorganismos va a la par.

En cuanto a la presencia o ausencia de huevos nematodos en el efluente, destacar que el agua de salida de la EDAR A contenía uno o más por cada 10 litros de muestra.

4.2. EDAR B

- Evolución de los parámetros medidos in situ: pH, oxígeno disuelto, temperatura y conductividad.

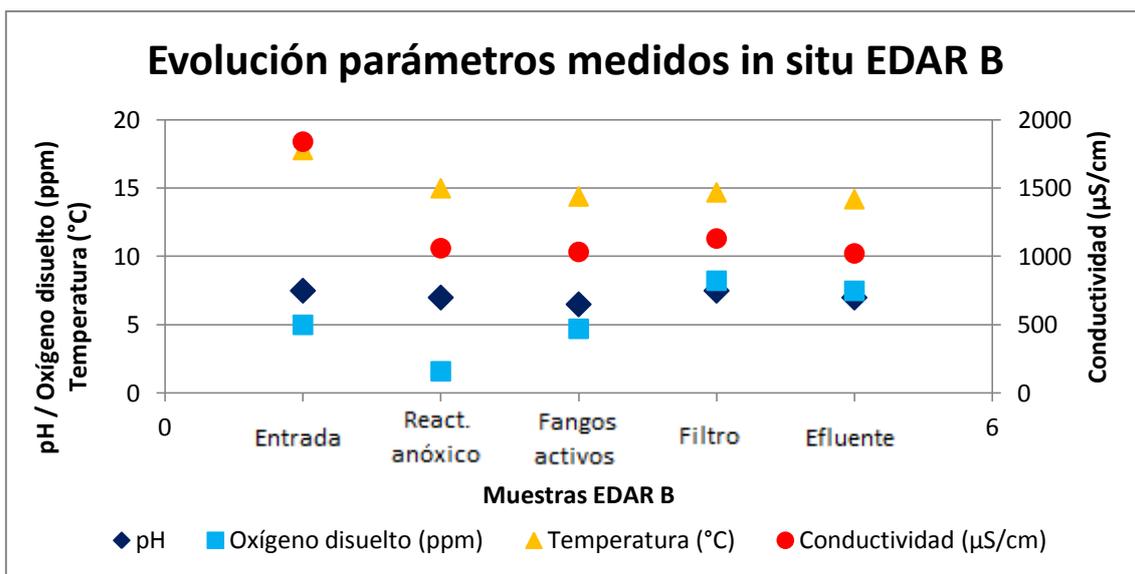


Figura 30. Evolución de los parámetros medidos in situ de la EDAR B. Fuente: Elaboración propia

Todos los parámetros llevan una tendencia prácticamente constante. El pH no sufre alteraciones puesto que en las etapas no es necesario realizar ningún ajuste para el correcto funcionamiento de los tratamientos. Lo mismo sucede con la temperatura, que se mantiene a temperatura ambiente durante todo el proceso de depuración.

Tras el reactor anóxico, debido a la eliminación de nutrientes y materia orgánica del agua residual urbana, y por tanto la consecuente eliminación de sólidos suspendidos y disueltos, se produce un destacable descenso en la conductividad. A partir de este punto, los valores permanecen estables.

Simplemente destacar las oscilaciones del oxígeno disuelto. Tras el paso del agua residual urbana por el reactor anóxico hay una notable disminución de oxígeno disuelto como consecuencia del tratamiento puesto que dispone de zona aerobia y anaerobia para llevar a cabo la eliminación de nutrientes principalmente, y de la materia orgánica. A continuación, una vez pasado el tratamiento biológico se produce una subida que contrarresta la disminución de la etapa anterior. Al tratarse de un proceso de fangos activos, es necesario

para su funcionamiento un sistema de aireación y agitación que suministre oxígeno para activar la acción depuradora de las bacterias aerobias (Metcalf and Eddy, 1995). Es por ello que el oxígeno disuelto aumenta tras esta etapa. A partir de este punto, no se observan variaciones significativas en el proceso de depuración.

- Evolución de la materia orgánica: DQO y COD

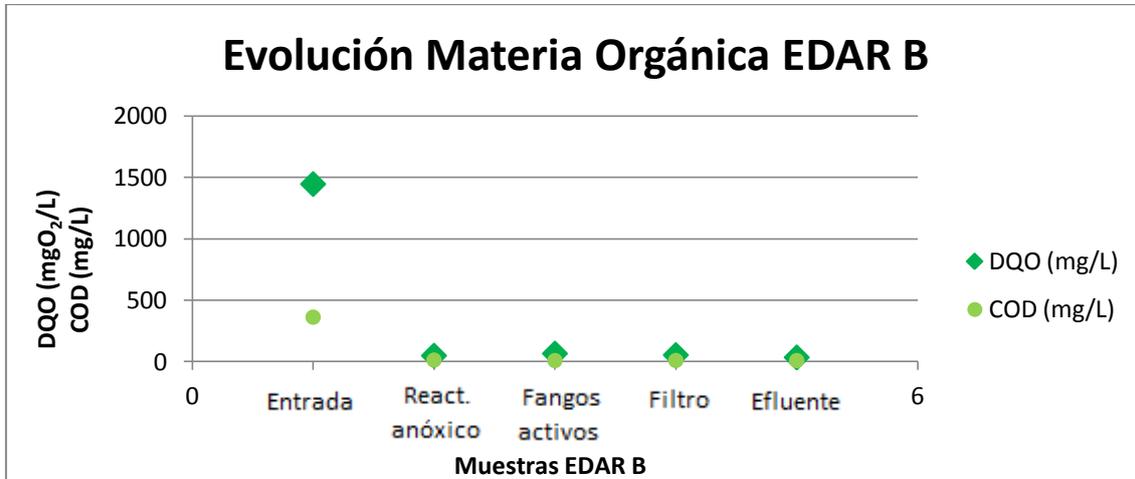


Figura 31. Evolución de la materia orgánica de la EDAR B. Fuente: Elaboración propia

Se observa una drástica disminución de la materia orgánica tras el paso del agua residual urbana por el reactor anóxico, tratamiento biológico encargado principalmente de la eliminación de nitrógeno y fósforo además de materia orgánica y sólidos en suspensión. Dicho tratamiento combinado con el posterior proceso de fangos activos, destinado también a la eliminación de la materia orgánica presente en el agua residual, logra mantener la DQO y el COD a unos niveles bajos y constantes acordes a la legislación vigente.

Atendiendo únicamente a la variación de estos parámetros, DQO y COD, el tratamiento con fangos activos podría ser eliminado de la línea de aguas (no siendo posible por la evolución de microorganismos y nutrientes).

- Evolución de los sólidos en suspensión y la turbidez

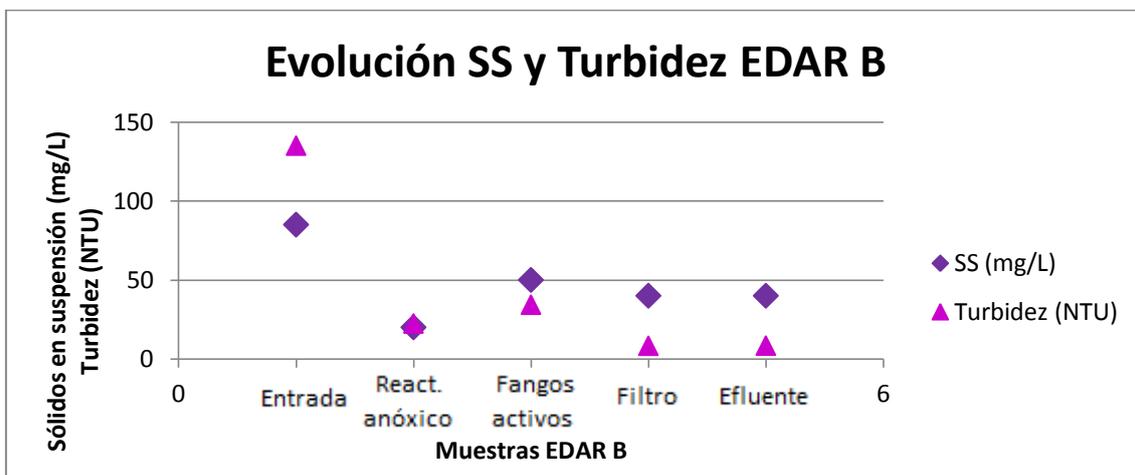


Figura 32. Evolución de los sólidos en suspensión y la turbidez de la EDAR B. Fuente: Elaboración propia

Los sólidos en suspensión y la turbidez disminuyen notablemente tras el paso del agua residual urbana por el reactor anóxico. Se observa como dicho tratamiento no solamente se encarga de eliminar nutrientes y materia orgánica, sino que también disminuye la carga contaminante del agua bruta en general, decantando en este caso gran parte de los sólidos en suspensión presentes.

Destacar el leve aumento de ambos parámetros tras el tratamiento biológico de fangos activados, proceso por el los microorganismos capturan la materia orgánica alimentándose de ella y generando partículas con peso suficiente para su posterior decantación (Metcalf and Eddy, 1995). Dicha subida es debida a que la muestra de agua es tomada justo después de este proceso, es decir, antes de pasar por el clarificador donde tiene lugar la decantación de los fangos floculados de la etapa anterior. Una vez pasado el decantador secundario y el filtro colocado a continuación, se observa como la concentración de sólidos en suspensión y la turbidez disminuye y permanecen prácticamente constantes hasta la salida de la planta.

- Evolución de los nutrientes: fósforo, nitritos, nitratos y nitrógeno amoniacal

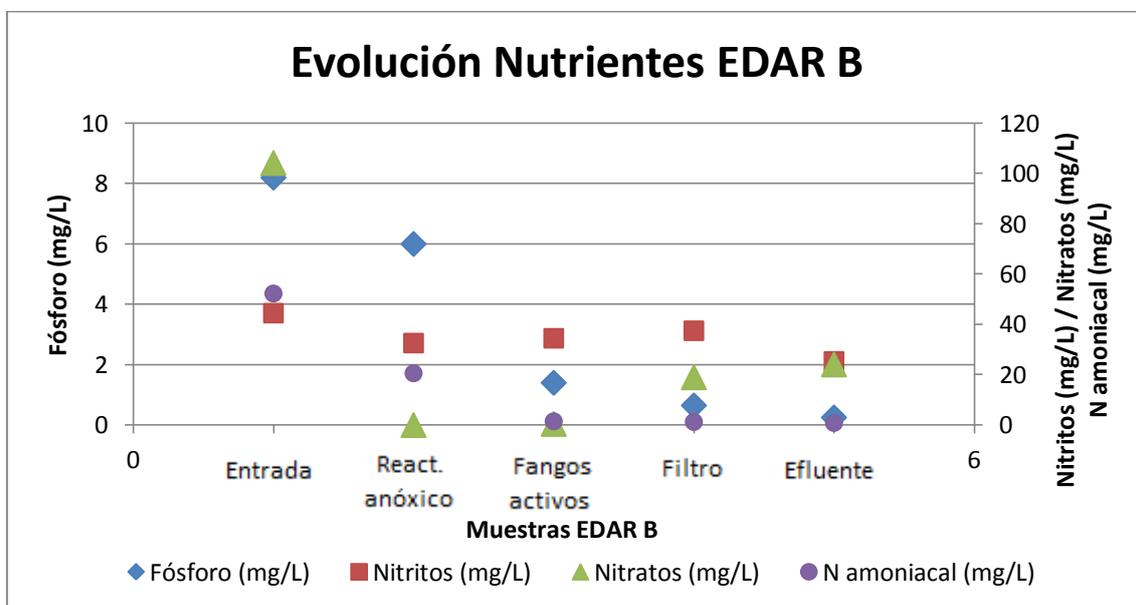


Figura 33. Evolución de los nutrientes analizados de la EDAR B. Fuente: Elaboración propia

En la Figura 33 queda reflejado el importante papel que desempeña en reactor anóxico disminuyendo sustancialmente la concentración de nitrógeno y fósforo presente en el agua residual urbana.

En el reactor, uno de los procesos que se lleva a cabo es la aceleración del proceso nitrificación-desnitrificación mediante la aireación, así se reduce al máximo la concentración de nitratos que pasan a formar parte de la atmósfera como N_2 (Laborda, 2013). Tras los fangos activos sucede lo mismo, debido al tanque de aireación la cantidad de nitratos sigue siendo mínima. A partir de este punto, como consecuencia del ciclo del nitrógeno y la presencia de otras formas de este elemento, se observa un leve aumento hasta finalizar el proceso de depuración.

En cuanto al nitrógeno amoniacal y los nitritos, nuevamente tiene lugar una reducción en la concentración de los dos tras el reactor anóxico. Desde aquí, la oxidación del nitrógeno amoniacal va de la mano del aumento de nitritos en el agua residual urbana y permanece prácticamente constante hasta el final de la línea. Destacar que dicha reacción comienza en el tratamiento biológico de fangos activados como consecuencia de la constante aireación y oxidación de la materia orgánica que tiene lugar.

Por último, el fósforo disminuye su concentración gradualmente registrando su descenso más drástico tras el proceso de fangos activados, donde los nutrientes son esenciales para el buen funcionamiento del tratamiento puesto que son el sustento de los microorganismos encargados de la eliminación de la materia orgánica presente en el agua residual urbana. Por tanto, la disminución es consecuencia de la actividad bacteriana llevada a cabo en el tratamiento secundario. A partir de este punto, la cantidad de fósforo sigue bajando hasta reducirse casi por completo.

- Evolución microbiológica: coliformes totales, *Escherichia coli*, enterococos y huevos de nemátodos.

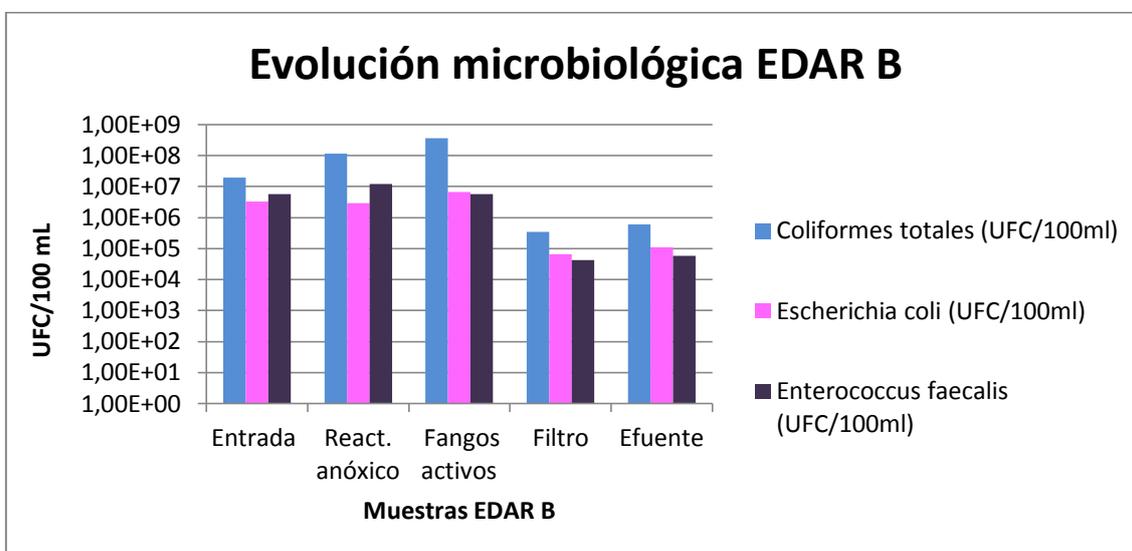


Figura 34. Evolución de los parámetros microbiológicos analizados de la EDAR B. Fuente: Elaboración propia

La variación de la concentración de microorganismos a lo largo de la línea de aguas tiene dos picos pertenecientes a la salida del reactor anóxico y del reactor de fangos. Se debe a la naturaleza de ambos procesos, donde tiene lugar la proliferación de microorganismos para llevar a cabo sus funciones depurativas.

Además, como se ha explicado en la Figura 34, la muestra de agua corresponde a la salida de los fangos activos directamente, sin pasar por el decantador secundario encargado de clarificar el agua residual urbana, donde se produce la separación de los fangos floculados y el agua tratada. Por lo tanto, tras el proceso de fangos activos, debido a utilización de microorganismos para realizar el tratamiento y la consecuente eliminación de materia orgánica, la concentración de bacterias aumenta, especialmente la de coliformes totales.

Como la *Escherichia coli* y los *Enterococcus faecalis* son indicadores de contaminación fecal, no se observa una proliferación tan alta como en el caso de las coliformes totales que engloba bacterias de caracteres diferentes que pueden verse favorecidos por las condiciones de estos tratamientos biológicos.

A partir de ahí, la concentración de todos los microorganismos analizados se reduce entre 10^1 - 10^3 a lo largo del proceso de depuración, teniendo la reducción más notable tras la decantación secundaria.

Por último, destacar la presencia de huevos de nematodos en el efluente de la EDAR B.

4.3. EDAR C

- Evolución de los parámetros medidos in situ: pH, oxígeno disuelto, temperatura y conductividad.

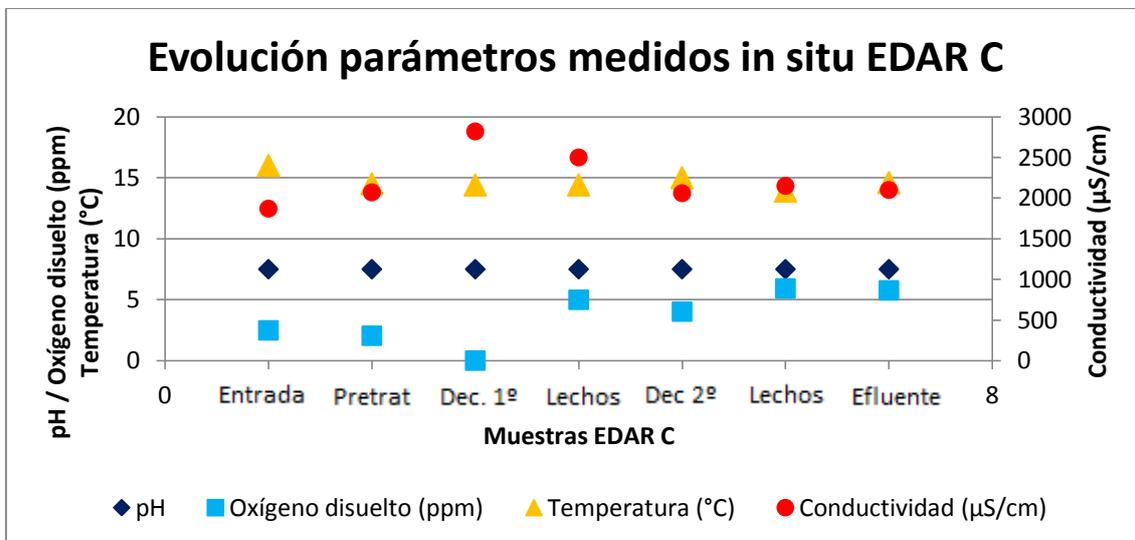


Figura 35. Evolución de los parámetros medidos in situ de la EDAR C. Fuente: Elaboración propia

La evolución de los parámetros a lo largo del tratamiento es prácticamente constante. El pH, como ocurre en la EDAR A y B, no necesita ser ajustado en ninguna de las etapas, por ello no se registra ninguna variación. En cuanto a la temperatura sucede lo mismo, el agua residual urbana se encuentra a temperatura ambiente, de manera que los altibajos producidos son mínimos.

En la Figura 35 queda reflejado como en el punto 3, correspondiente a la salida del decantador primario, hay unas variaciones en la conductividad y el oxígeno disuelto. Dichas alteraciones son consecuencia de la adición de lixiviados de un vertedero próximo a la planta de tratamiento, generando así una disminución total del oxígeno y un aumento de la conductividad.

Por un lado, la conductividad aumenta debido al aumento de sales en forma de sólidos suspendidos y disueltos que contiene el lixiviado. A partir de este punto, los valores vuelven a estabilizarse y se mantienen relativamente constantes.

Por otro, como consecuencia del brusco aumento de materia orgánica y microorganismos en el agua residual urbana debido al vertido del lixiviado procedente de un vertedero, el oxígeno disuelto es consumido rápidamente. A continuación, tras la etapa de lechos bacterianos donde el caudal se deja caer sobre unos filtros compuestos por microorganismos encargados de degradar la materia orgánica (Trapote, 2011), se observa un pequeño aumento en la concentración de oxígeno. De este modo, al verter el agua residual en forma de lluvia se consigue una aireación que permite la incorporación de oxígeno al flujo. A partir de este punto, la cantidad de oxígeno disuelto permanece prácticamente constante hasta el final.

- Evolución de la materia orgánica: DQO y COD

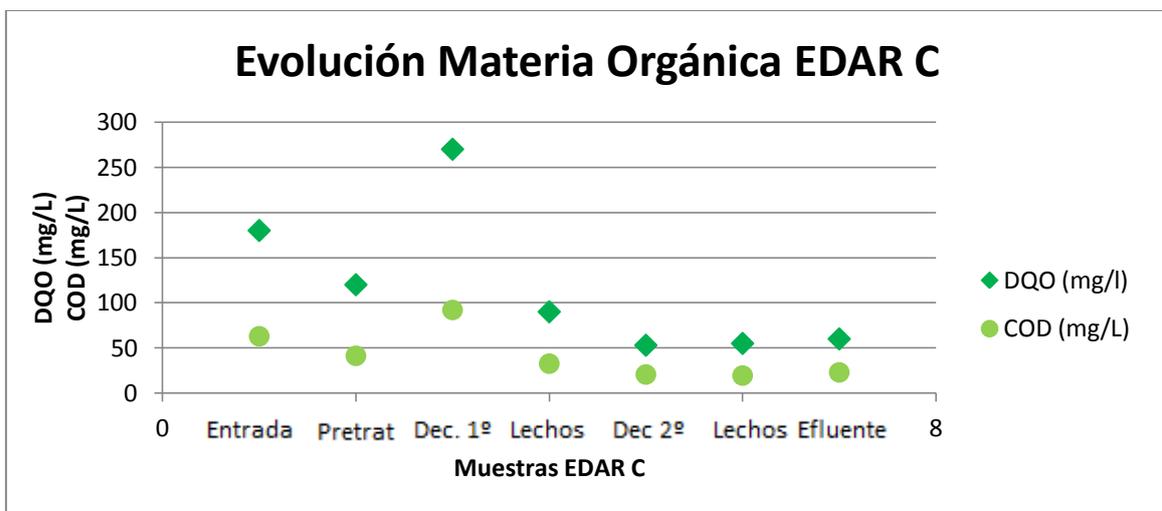


Figura 36. Evolución de la materia orgánica de la EDAR C. Fuente: Elaboración propia

Nuevamente, tras la salida del decantador primario se observan altibajos en la concentración de DQO y COD debido a la materia orgánica aportada por el lixiviado.

Es especialmente la DQO la que se dispara, es decir, la cantidad de oxígeno necesario para oxidar la materia orgánica presente en el agua residual urbana. De manera que dicho parámetro indica la elevada carga de materia orgánica presente en el lixiviado del vertedero. Además, como el decantador primario es responsable principalmente de la sedimentación de sólidos en suspensión, el tratamiento no contrarresta la acción del vertido. Es por ello que tras la etapa de lechos bacterianos, donde los microorganismos degradan la materia orgánica, se observa un importante descenso que coloca a la DQO en valores equiparables a los registrados antes del vertido del lixiviado. Y es después del decantador secundario donde, una vez clarificado el caudal y decantados los fangos biológicos, se estabiliza el valor de la DQO.

Aunque no tan bruscamente, la concentración del COD aumenta de manera notable, es decir la cantidad de carbono que se generaría en caso de oxidar la materia orgánica del agua residual urbana. Como los dos parámetros son indicadores de la cantidad de materia orgánica

presente, la tendencia seguida por ambos es la misma. Tras el pico ocasionado por el lixiviado del vertedero, la concentración disminuye por la acción de los microorganismos presentes en los filtros percoladores, terminando de descender tras el paso por el decantador secundario. A partir de este punto los valores permanecen estables y prácticamente constantes hasta la salida de la planta.

- Evolución de los sólidos en suspensión y la turbidez

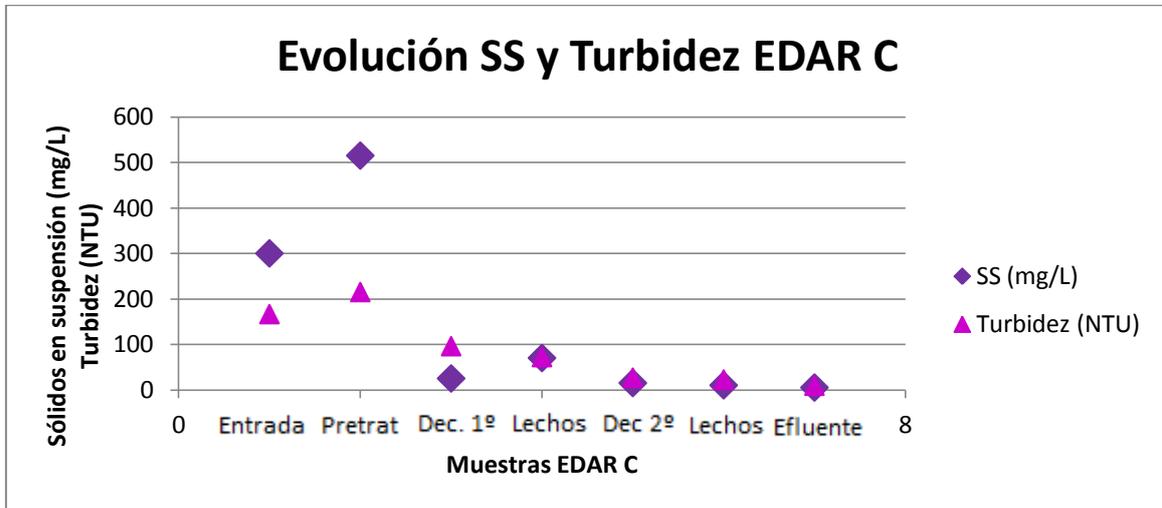


Figura 37. Evolución de los sólidos en suspensión y la turbidez de la EDAR C. Fuente: Elaboración propia

En el caso de los sólidos en suspensión, la adición del lixiviado produce que su concentración baje notablemente puesto que, el aumento de caudal es sustancial mientras que la cantidad de sólidos suspendidos no lo es. Tras el tratamiento biológico de lechos bacterianos, donde se produce la degradación de la materia orgánica y la generación de fangos biológicos (Trapote, 2011), se observa un aumento en la concentración de sólidos en suspensión. Dicho aumento es debido a que la muestra es tomada antes de decantar el agua de salida de los lechos bacterianos, es decir, con todavía flóculos y partículas suspendidas. Una vez pasado por el decantador secundario, los valores de sólidos en suspensión permanecen bajos y constantes.

La turbidez en cambio no refleja variaciones tan notables. Simplemente es a partir del decantador primario donde comienza a disminuir su valor, para continuar con el tratamiento biológico, donde no se registra prácticamente variación, y finalmente concluir con la decantación secundaria para clarificar el caudal. A partir de este punto los valores de turbidez son constantes pero no todo lo bajos que se esperaban debido a la presencia de materia orgánica refractaria presente en el lixiviado del vertedero.

Evolución de los nutrientes: fósforo, nitritos, nitratos y nitrógeno amoniacal

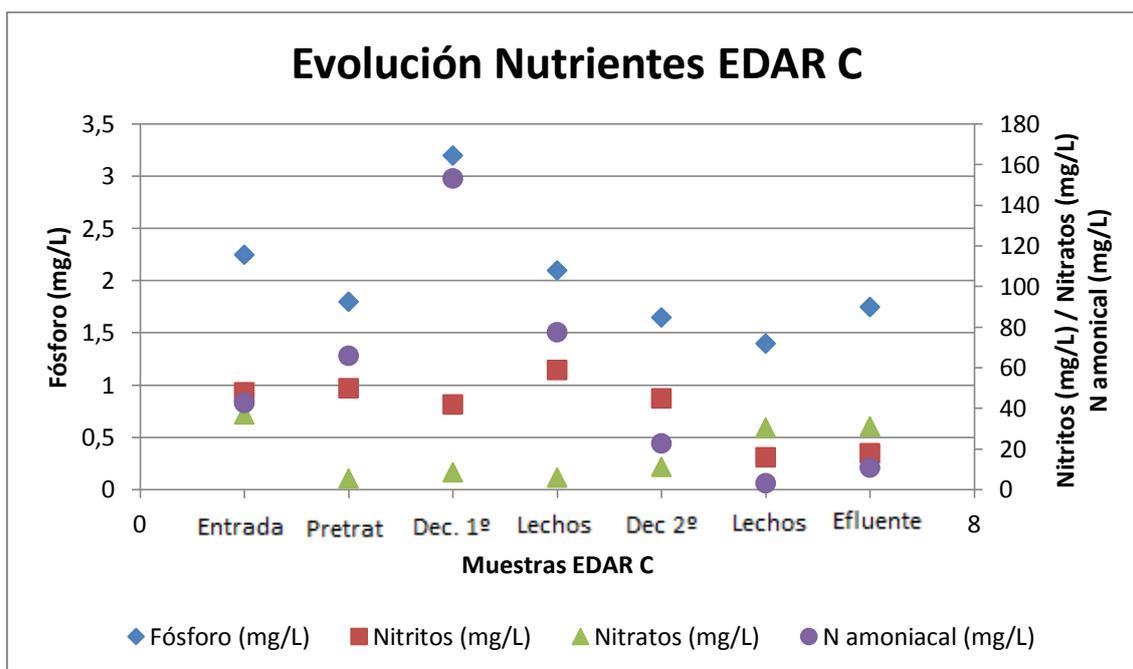


Figura 38. Evolución de los nutrientes analizados de la EDAR C. Fuente: Elaboración propia

Tanto el fósforo como el nitrógeno total presente en el agua residual urbana aumentan tras la decantación primaria, etapa encargada de la eliminación de sólidos en suspensión y receptor del lixiviado procedente de un vertedero próximo a la EDAR.

La concentración de fósforo presenta una crecida sustancial como consecuencia del lixiviado. A partir de este punto, debido al tratamiento biológico de lechos bacterianos donde resulta esencial la presencia de nutrientes para un correcto funcionamiento, el fósforo va decreciendo puesto que es consumido por los microorganismos encargados de la degradación de la materia orgánica. Por ello tras el primer proceso de lechos bacterianos se observa una disminución que se afianza tras la posterior decantación y un segundo sistema de filtros percoladores.

El otro nutriente que experimenta un drástico aumento es el nitrógeno amoniacal. La tendencia seguida es idéntica a la del fósforo, disminuyendo conforme el agua residual urbana pasa por los lechos bacterianos y sus respectivos decantadores debido a la actividad microbiológica del tratamiento biológico utilizado para la degradación de la materia orgánica.

Por último, las concentraciones de nitratos y nitritos no reflejan el aporte de lixiviado en el decantador primario de la línea de tratamiento. Únicamente es posible que los valores de nitratos registrados desde el decantador primario sean tan bajos debido a la poca cantidad de oxígeno disuelto en el agua, de manera que, tiene lugar un proceso de desnitrificación donde se reduce al máximo la concentración de nitratos que pasan a formar parte de la atmósfera como N_2 , cediendo así la molécula de oxígeno al agua residual urbana (Laborda, 2013). A partir de ahí, se mantiene un equilibrio entre el oxígeno disuelto presente en el caudal y la concentración de nitratos.

En el caso de los nitritos, su concentración va disminuyendo conforme lo hace la cantidad de nitrógeno amoniacal a lo largo de la línea de tratamiento de la EDAR hasta permanecer prácticamente estable tras el sistema de lechos bacterianos de baja carga y su posterior decantador.

- Evolución microbiológica: coliformes totales, *Escherichia coli* y enterococos

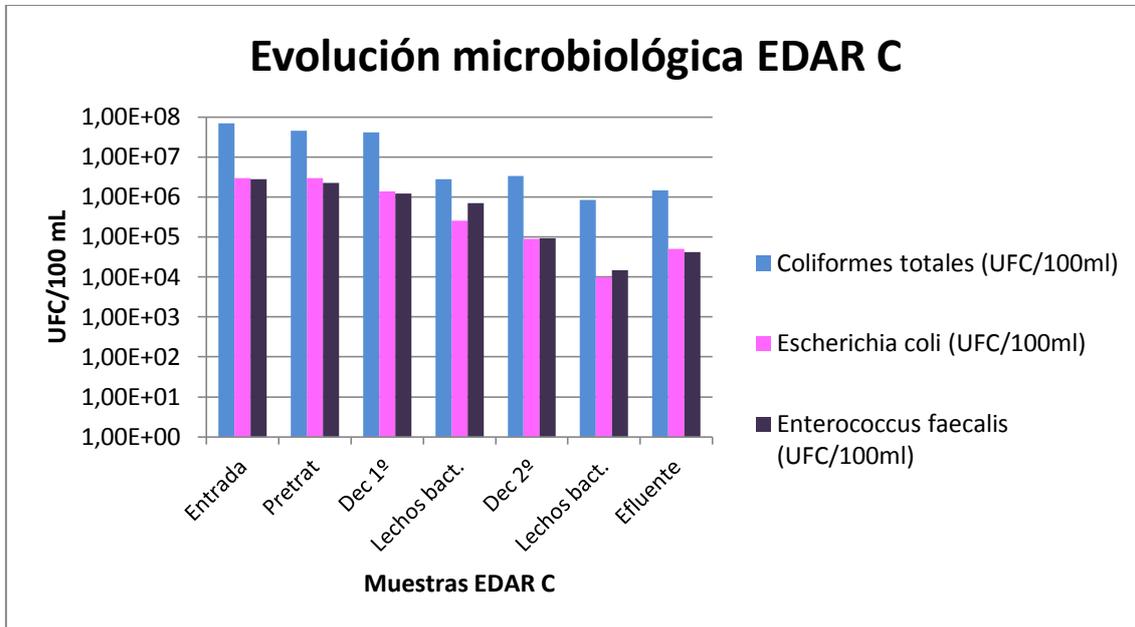


Figura 39. Evolución de los parámetros microbiológicos analizados de la EDAR C. Fuente: Elaboración propia

La tendencia seguida por los microorganismos a lo largo de la línea de tratamiento consiste en ir reduciendo paulatinamente su concentración, pero no se determina una disminución notable hasta la salida del lecho de alta carga y la posterior decantación de los fangos biológicos generados. A partir de este punto, hay una nueva y notable bajada tras el segundo proceso de lechos, debido nuevamente a la actividad microbiológica, y un leve crecimiento tras el decantador de baja carga situado a continuación debido a la propia proliferación de los organismos.

La concentración de los microorganismos se reduce a lo largo de la línea de aguas, disminuyendo del orden de 10^1 - 10^2 la concentración de cada microorganismo. Destacar que en este caso no queda reflejado a través de ninguno de los parámetros microbiológicos analizados el vertido de lixiviado procedente de un vertedero próximo a la zona. No ha generado ni un aumento ni una disminución, simplemente las unidades formadoras de colonia han permanecido prácticamente estables.

Por último, añadir que el agua de salida de la EDAR C contenía uno o más huevos de nematodos por cada 10 litros de muestra analizados.

4.4. Influencia de las etapas de depuración en la evolución de los contaminantes.

A raíz de los resultados obtenidos, se lleva a cabo un estudio comparativo que permita conocer cómo afectan los diferentes tratamientos en cuanto a la reducción o eliminación de los contaminantes analizados presentes en las aguas residuales.

Para ello y con el fin de sintetizar todos los datos, se calcula el porcentaje de reducción de contaminantes obtenido en las etapas más significativas de cada EDAR, es decir, aquellas que corresponden principalmente al final del tratamiento primario y biológico puesto que es donde se registran las variaciones más relevantes.

A continuación se presenta de manera esquematizada los sistemas de depuración utilizados por cada una de las EDAR objeto de estudio, marcando en cada caso las etapas, y por tanto los tratamientos utilizados, con sus respectivas reducciones.

PORCENTAJES DE REDUCCIÓN EDAR A

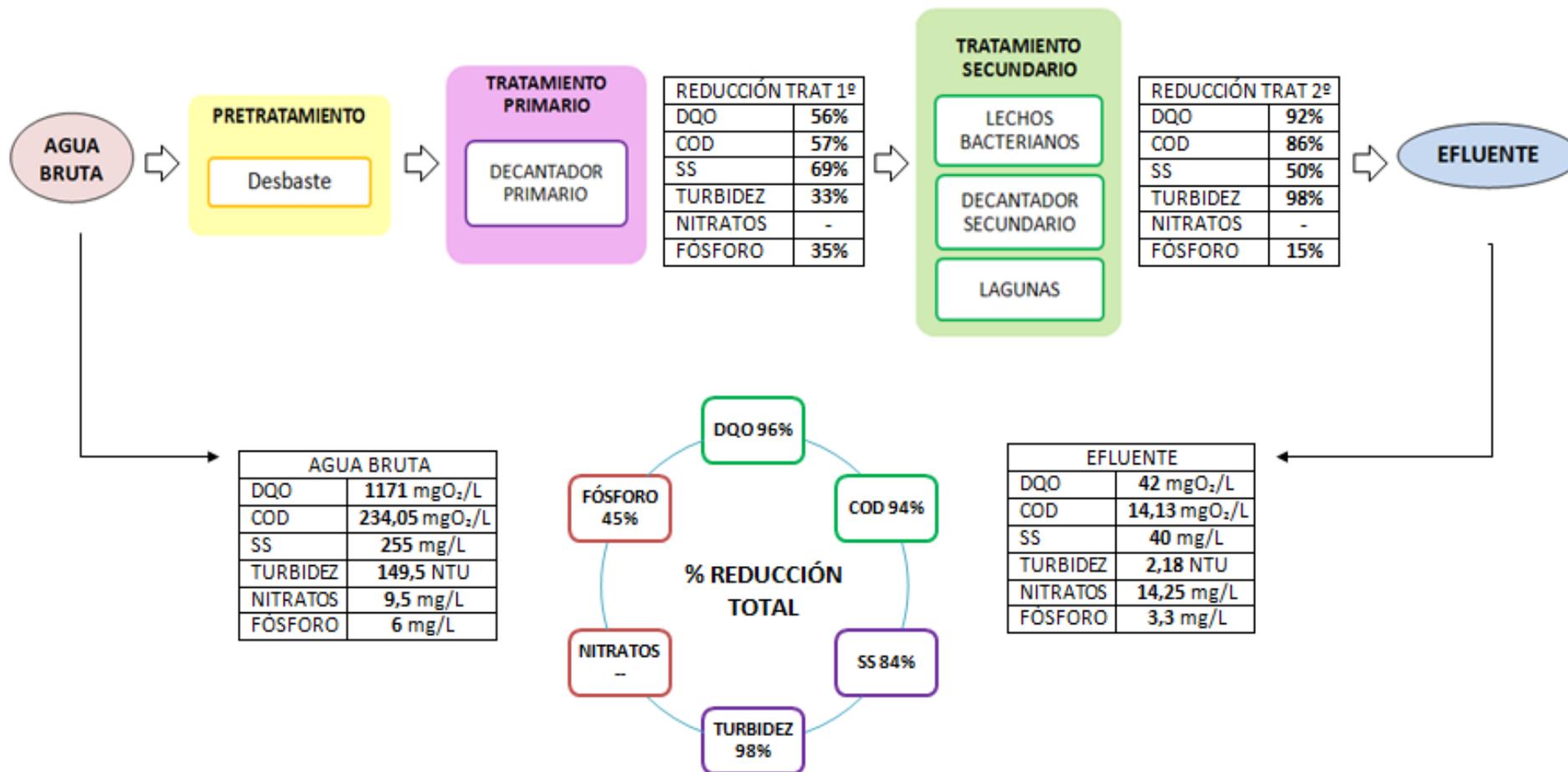


Figura 40. Porcentajes de reducción de los parámetros analizados a lo largo de la línea de tratamiento de la EDAR A. Fuente: Elaboración propia

PORCENTAJES DE REDUCCIÓN EDAR B

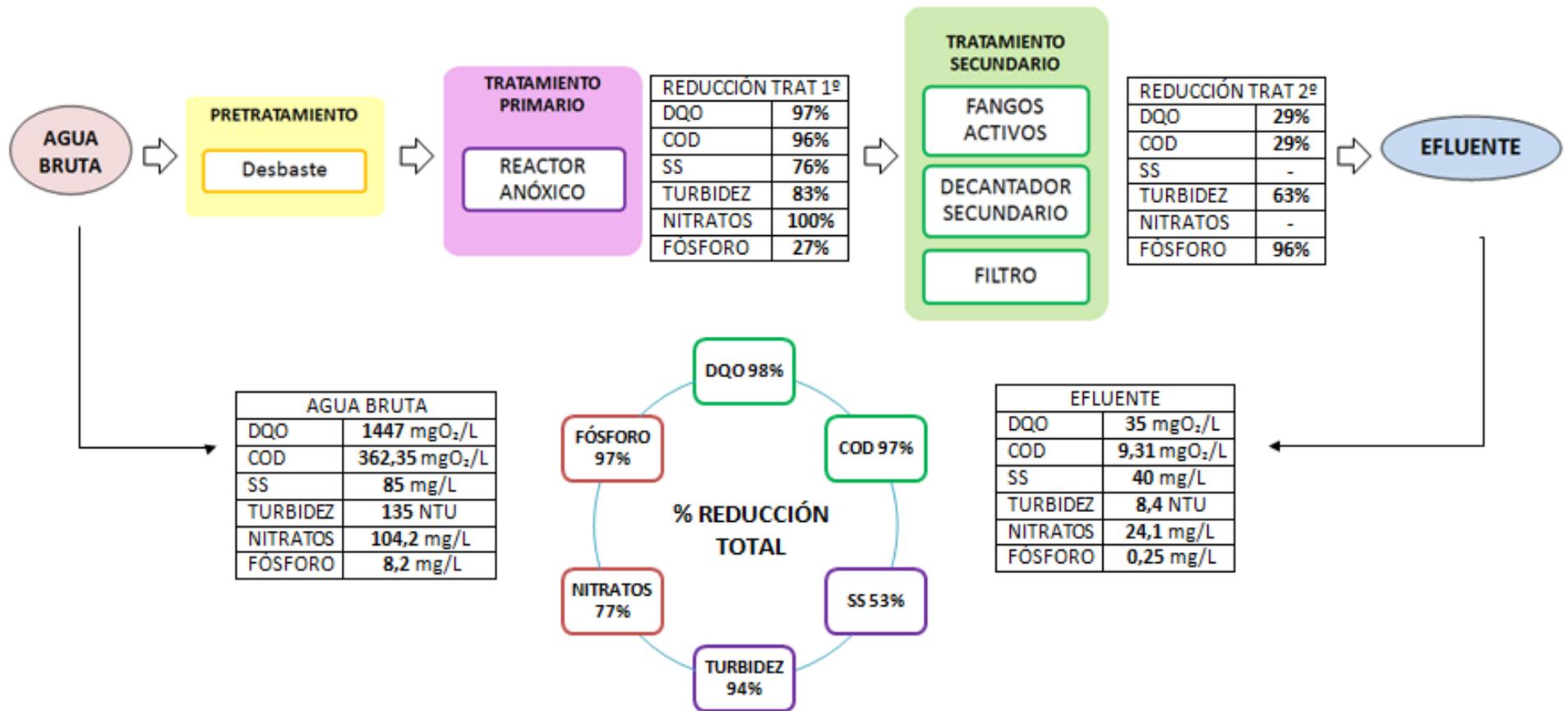


Figura 41. Porcentajes de reducción de los parámetros analizados a lo largo de la línea de tratamiento de la EDAR B. Fuente: Elaboración propia

PORCENTAJES DE REDUCCIÓN EDAR C

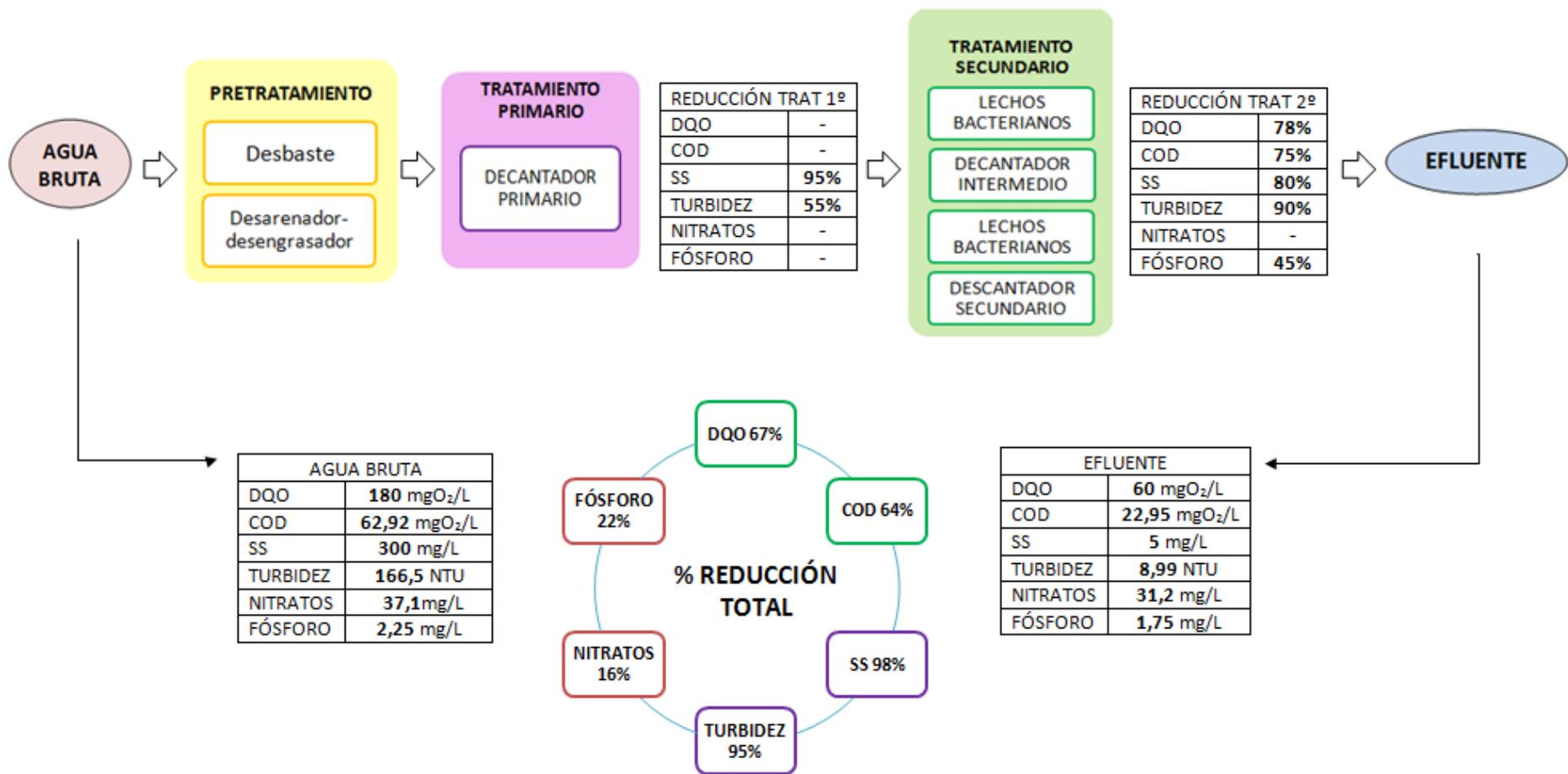


Figura 42. Porcentajes de reducción de los parámetros analizados a lo largo de la línea de tratamiento de la EDAR C. Fuente: Elaboración propia

Atendiendo al **tratamiento primario** llevado a cabo en las EDAR objeto de estudio, los aspectos a destacar son: la importante reducción de materia orgánica realizada por el reactor anóxico de la EDAR B (situado antes del tratamiento biológico reduciéndole así notablemente la carga orgánica). En cuanto a la cantidad de sólidos presentes en el agua, añadir que la aparente poca eliminación de la EDAR A, es consecuencia de las condiciones climatológica del día del muestreo. Debido a las lluvias se observa poca disminución tanto en turbidez como en sólidos en suspensión. En la EDAR B es mayor la eliminación de turbidez debido al trabajo realizado con la materia orgánica en el reactor. En la EDAR C también se registran datos positivos, especialmente en sólidos en suspensión. Además, aunque la turbidez en este caso sea mayor, a lo largo de la línea de aguas tras pasar por los decantadores, el agua residual urbana se irá clarificando. Por último, la eliminación de nutrientes de la EDAR B destaca por su completa eliminación de nitratos debido a la aceleración del proceso de desnitrificación mediante la aireación. De este modo se reduce al máximo la concentración de nitratos que pasan a formar parte de la atmósfera como N_2

Por lo tanto, la EDAR B al utilizar un reactor anóxico como tratamiento primario previo al proceso biológico, consigue eliminar satisfactoriamente tanto la materia orgánica como los sólidos y nutrientes presentes en el agua residual.

Atendiendo al **tratamiento secundario** llevado a cabo en las EDAR objeto de estudio se observa que: EDAR A y EDAR C comparten como tratamiento secundario principal los filtros percoladores. La diferencia reside en que la EDAR A se complementa con un sistema de lagunaje mientras que en la EDAR C se realiza el tratamiento por duplicado. Los resultados obtenidos reflejan que la combinación del lecho biológico con el lagunaje consigue eliminar mayor cantidad de materia orgánica y teóricamente, la eliminación de sólidos en suspensión también debería ser superior, pero debido a las condiciones de muestreo nombradas anteriormente, resulta poco fiable incluir este parámetro.

Por otro lado, el reactor anóxico de la EDAR B ha eliminado una elevada parte de los sólidos en suspensión presentes en el agua residual urbana, pero tras el tratamiento biológico no se ha obtenido la reducción esperada. Nuevamente puede ser consecuencia de unas condiciones climatológicas poco favorables el día del muestreo, provocando así un aumento en la concentración de sólidos entre la salida del decantador secundario y el filtro previo a la salida del agua tratada. A pesar de ello, destacar que el fósforo que no ha sido eliminado en el reactor, tras los fangos activados es reducido casi por completo.

Por último, para tener una perspectiva general de las reducciones llevadas a cabo por cada planta, los diagramas recogen la eliminación realizada de cada parámetro entre el agua bruta y el efluente.

Los datos recogidos muestran lo siguiente:

- En cuanto a la materia orgánica, los mayores porcentajes de reducción se dan en la EDAR B debido a la instalación de un reactor anóxico previo al tratamiento biológico. La EDAR A, combinando los filtros percoladores con un sistema de lagunaje a modo de afino, también resulta muy interesante, obteniendo altos porcentajes de reducción.

· En cuanto a los sólidos presentes en el agua residual, destacar que, contar con un decantador primario seguido de dos lechos bacterianos con sus correspondientes decantadores de la EDAR C, supone una importante reducción de sólidos en suspensión y turbidez. A pesar de ello, la EDAR A con las lagunas de maduración, contribuyen también a la decantación y por tanto a la disminución de sólidos en suspensión.

· En cuanto a la eliminación de nutrientes, es el reactor anóxico de la EDAR B, la etapa que logra una mayor reducción de éstos.

Haciendo referencia a la evolución microbiológica a lo largo de la línea de aguas de una planta de tratamiento, destacar que la tendencia es ir disminuyendo la concentración (exceptuando en el reactor anóxico), especialmente tras la decantación posterior al tratamiento biológico. Pero a pesar de ello, los valores en la EDAR B y la EDAR C son altos. De manera que, el sistema de lagunaje implantado en la EDAR A cobra especial importancia ante dicho aspecto puesto que actúa a modo de desinfectante natural. Destacar que, a pesar de analizar bacterias pertenecientes a diferentes grupos (Coliformes totales y E coli gram-negativas y *Enterococcus faecalis* gram-positiva) no se aprecia ninguna distinción relevante a lo largo del tratamiento.

4.5. Reutilización de los efluentes de las EDAR objeto de estudio

A continuación se muestra la caracterización de los efluentes de las EDAR objeto de estudio atendiendo únicamente a las exigencias marcadas por el RD 1620/2007:

Tabla 18. Efluentes EDAR objeto de estudio

	SS (mg/L)	TURBIDEZ (NTU)	NEMÁTODOS INTESTINALES	<i>Escherichia-Coli</i> (UFC/100mL)
EDAR A	40	2,13	Presencia	1,00E+03
EDAR B	40	8,4	Presencia	1,10E+05
EDAR C	5	8,9	Presencia	5,00E+04

En función de los resultados obtenidos y los límites establecidos por la legislación vigente (Tabla 4. Límites exigidos por el RD 1620/2007 para la reutilización de aguas residuales urbanas), los posibles usos a los que puede ser destinado el efluente de cada EDAR son los siguientes:

· EDAR A. Debido a la alta concentración de sólidos en suspensión, el agua de salida de la planta no se encuentra dentro del rango permitido por la ley para ningún uso. De manera que no puede ser reutilizada sin someterse a algún tratamiento adicional que sitúe dicho parámetro por debajo del límite de obligado cumplimiento.

Como mínimo, dicha concentración de sólidos en suspensión debería llegar a 35 mg/L para ser destinada a usos agrícolas (riego de productos de consumo humano, pastos y acuicultura, además de riego de cultivos leñosos, cultivo de flores y cultivo industrial no alimentario), a usos con fines industriales (como aguas de proceso y limpieza tanto de industria alimentaria como no) y para usos recreativos (estancques). Por último, también cubriría usos ambientales

como recarga de acuíferos por percolación localizada y riego de bosques, zonas verdes y silvicultura.

En caso de ampliar los posibles usos del agua sería necesario alcanzar unos valores menores de 20 mg/L en sólidos en suspensión además de una disminución en la concentración de *Escherichia coli*. De éste modo también quedarían reducidos los valores de turbidez y de huevos de nematodos y así el efluente podría ser destinado a cualquiera de los usos recogidos en la normativa.

· EDAR B. Tanto la concentración de sólidos en suspensión como la de *Escherichia Coli* están por encima del límite establecido. En éste caso sería necesario contar con un tratamiento terciario que disminuyera dichos valores.

Como mínimo, la concentración de sólidos en suspensión debería llegar a 35mg/L, como ocurre en la EDAR A, y la *Escherichia coli* a 10000 UFC/100mL para ser destinada a usos agrícolas para riego de cultivos leñosos, cultivo de flores y cultivo industrial no alimentario. También podría reutilizarse con fines industriales, como aguas de proceso y limpieza en industrias no alimentarias, y para usos recreativos tales como agua para estanques o masas de agua similares.

En caso de ampliar los posibles usos del agua sería necesario alcanzar unos valores menores de 20 mg/L para los sólidos en suspensión, con su correspondiente disminución de turbidez, y reducir la concentración de *Escherichia coli* hasta 1000 UFC/100mL. Así cumpliría los mínimos exigidos para ser reutilizada como riego de productos de consumo humano, pastos y acuicultura por un lado, y aguas de proceso y limpieza en industrias alimentarias por otro. Además podría servir de recarga de acuíferos por percolación localizada.

· EDAR C. La concentración de *Escherichia Coli* supera el límite permitido en todos los usos del agua previsto. Por lo tanto, el efluente de la planta sin ser sometido a tratamientos complementarios, solamente podrá ser destinado a aquel uso donde para ésta bacteria no esté establecido ningún límite, es decir, para usos ambientales, concretamente el punto 5.3, riego de bosques, zonas verdes y silvicultura.

En esta ocasión, como ocurre en la EDAR B, la concentración de *Escherichia coli* debería disminuir como mínimo hasta 10000 UFC/100mL para ser destinada a usos agrícolas (para riego de cultivos leñosos, cultivo de flores y cultivo industrial no alimentario), también con fines industriales (como aguas de proceso y limpieza en industrias no alimentarias), y para usos recreativos tales como agua para estanques o masas de agua similares.

En caso de seguir rebajando la concentración de *Escherichia coli* también sería necesario disminuir la turbidez hasta 1 NTU, así el efluente podría ser destinado a cualquiera de los usos recogidos en la normativa.

Destacar que en el caso de las 3 EDAR objeto de estudio, han sido principalmente los sólidos en suspensión y la *Echerichia Coli* los parámetros que han condicionado la posibilidad de contar con un efluente apto o no para ser reutilizado. Esto así porque tanto la turbidez como la

presencia de huevos de nematodos para varios usos, a pesar de estar regulados, no presentan ningún máximo permitido. Es decir, la legislación cuenta con una serie de usos previstos del agua donde dichos parámetros no necesitan estar situados dentro de ningún rango puesto que no tienen establecido ningún límite. Ocurre por ejemplo en el agua destinada a riego de bosques, donde los valores de turbidez, huevos de nemátodos y *Escherichia coli*, no limitan el uso posterior del agua, mientras que la concentración máxima de sólidos en suspensión está fijada en 35 mg/L.

- Propuesta de tratamientos complementarios

Debido a los resultados obtenidos tras la caracterización físico-química y microbiológica del efluente de las EDAR objeto de estudio, se plantea la posibilidad de aplicar tratamientos adicionales con el fin de disminuir la concentración de aquellos parámetros que superan el límite legislado.

La elección de las técnicas de afino y desinfección propuestas, se ha basado tanto en la sencillez de su aplicación como en los buenos resultados obtenidos en proyectos anteriores.

• Sólidos en suspensión

Para disminuir la concentración de sólidos en suspensión en el efluente se plantea la instalación de filtros de arena a la salida del decantador secundario. Se trata de lechos de material granular o de arena de tamaño de grano relativamente uniforme (0.3-25 mm) y que están adecuadamente drenados por la parte de abajo. Es una tecnología de depuración interesante de cara a la eliminación de sólidos en suspensión y turbidez previo al vertido a la naturaleza o a su posible reutilización como es el caso.

Además, tanto el costo de energía como el de mantenimiento son muy bajos debido a la sencillez de su diseño, construcción, operación y mantenimiento.

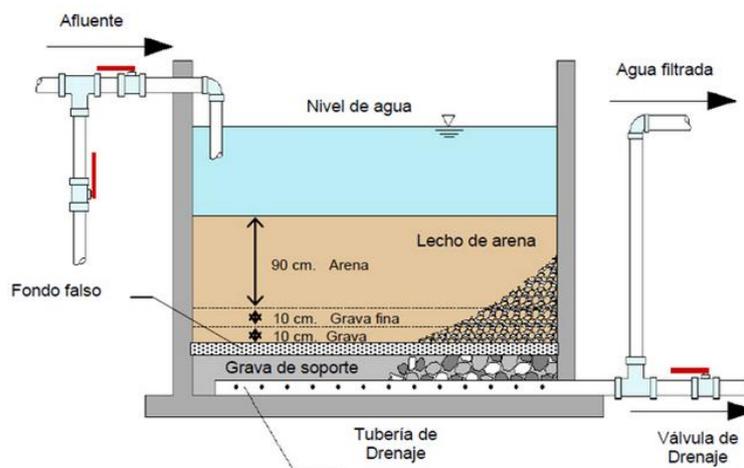


Figura 43. Proceso de filtración (lecho de arena). Fuente: Biblioteca virtual, FUNDESYRAM

Por otro lado está la tecnología de membrana que, al igual que los filtros de arena, ofrece la posibilidad de una clarificación y desinfección simultánea sin la necesidad de adición de

productos químicos que puedan reaccionar con las impurezas del agua generándose subproductos indeseables.

Se trata de una serie de procesos de separación en los que se emplean membranas semipermeables para tratar las aguas residuales. La membrana actúa como un filtro muy específico que dejará pasar el agua mientras que los sólidos suspendidos, microorganismos y otras sustancias quedan retenidos. Hay varios métodos para permitir que las sustancias atraviesen una membrana: la aplicación de alta presión, el mantenimiento de un gradiente de concentración en ambos lados de la membrana o la introducción de un potencial eléctrico. Además, en función del tamaño de partícula retenida, la filtración de membrana se puede dividir en micro filtración, ultrafiltración, electrodiálisis, nano filtración y ósmosis inversa (Díez, 2004).

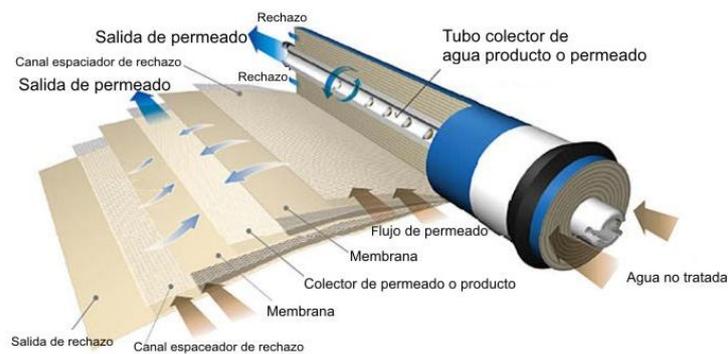


Figura 44. Funcionamiento de un sistema de membrana. Fuente: SOSTAQUA, 2010

En la Tabla 19 se sintetizan las ventajas y desventajas de cada uno de los tratamientos terciarios explicados:

Tabla 19. Aspectos positivos y negativos de los lechos de arena y la tecnología de membranas

MÉTODO	ASPECTOS POSITIVOS	ASPECTOS NEGATIVOS
LECHOS DE ARENA	<ul style="list-style-type: none"> · Coste de construcción y mantenimiento reducido. · Sencillo · Eficaz en la eliminación de sólidos en suspensión. · No utiliza elementos químicos. 	<ul style="list-style-type: none"> · No desinfecta. · Posible saturación de los filtros. · Lento.
TECNOLOGÍA DE MEMBRANAS	<ul style="list-style-type: none"> · Excelentes calidades del agua depurada · Espacio necesario reducido · Excelente desinfección además de reducir la concentración de materia orgánica y nutrientes. 	<ul style="list-style-type: none"> · Necesitan un pretratamiento riguroso · Mayor complejidad de operación · Costes de implantación y explotación superiores a los sistemas convencionales. · Las membranas pueden verse afectadas por vertidos específicos.

Atendiendo a datos bibliográficos, los porcentajes de reducción obtenidos tras la aplicación de estos tratamientos están recogidos en la Tabla 20 (Díez, 2004; SOSTAQUA, 2010):

Tabla 20. Porcentajes de reducción obtenidos tras un tratamiento de filtros de arena y un sistema de membranas

PARÁMETROS	LECHOS DE ARENA	TECNOLOGÍA DE MEMBRANA
Sólidos en suspensión	95%	98-100%
DQO	-	53%
Nitratos	-	25%
Fósforo	-	19%
<i>Escherichia coli</i>	-	100%
Coliformes totales	-	100%
Huevos de nematodos	-	100%

· *Escherichia coli*

Los procesos de regeneración más utilizados debido a su acción desinfectante son la cloración, la ozonización y la radiación ultravioleta.

La cloración consiste en la adición de cloro como desinfectante al agua a tratar. Se adiciona en forma de gas cloro, hipocloritos o compuestos clorados. Por otro lado, en el proceso de ozonización, las moléculas de oxígeno (O₂) son disociadas por medio de una fuente de energía produciendo átomos de Oxígeno que chocarán con una molécula de oxígeno para formar O₃ (ozono), que se utiliza como desinfectante.

La principal ventaja del uso de cloro frente al ozono es que se trata de uno de los procesos de desinfección más baratos, y por ello es el más usado en todo el mundo. Además, su aplicación no supone ningún problema, ya que es sencilla y no necesita una estructura grande y compleja para desarrollarlo. Todo lo contrario ocurre con el ozono que, a pesar de contar con una actuación más rápida, requiere maquinaria especial y gran cantidad de energía destinada a la generación de una corriente de oxígeno que se convierte en ozono “in situ”.

Además, aunque ambos tratamientos son muy eficaces en cuanto a desinfección de microorganismos, el cloro posee un poder residual que permite que su acción perdure en el agua una vez tratada, protegiendo así de la aparición de nuevos microorganismos o la reactivación de los ya atacados, mejorando la calidad del efluente durante cierto tiempo después del tratamiento. En el caso del ozono, éste no posee apenas poder residual ya que su vida media en el agua es de apenas 25 minutos, debido a que el ozono que no ha reaccionado tiende a degradarse rápidamente (EPA, 1999).

De todas formas, lo que a priori implica una ventaja, puede resultar todo lo contrario puesto que el cloro residual, aún a bajas concentraciones, es tóxico a los organismos acuáticos. Además, aunque el efluente de las EDAR contiene poca materia orgánica, el cloro oxida ciertos tipos de dicha materia orgánica generando compuestos más peligrosos (tales como los trihalometanos: cloroformo (CHCl₃), bromodiodorometano (CHBrCl₂), dibromoclorometano (CHBr₂Cl) y bromoformo (CHBr₃)).

Otro sistema utilizado es la desinfección con luz ultravioleta (UV). Consiste en transferir energía electromagnética desde una lámpara de vapor de mercurio al material genético del organismo. De este modo, cuando la radiación UV penetra en las paredes de la célula de un organismo, ésta destruye la habilidad de reproducción de la célula.

Se trata de un método eficaz para la desactivación de la mayoría de los microorganismos, pero tanto la cloración como la ozonización también reducen las concentraciones de materia orgánica, nutrientes y sólidos en suspensión, o materia orgánica y sólidos en suspensión, respectivamente. Por otro lado, la desinfección con luz ultravioleta es más un proceso físico que una desinfección química, lo cual elimina la necesidad de generar, manejar, transportar, o almacenar productos químicos tóxicos, peligrosos o corrosivos. Y a diferencia del cloro, no existe ningún efecto residual que pueda afectar a los seres humanos o cualquier organismo acuático. En contraposición algunas veces los organismos pueden reparar o invertir los efectos destructivos de la radiación UV mediante un “mecanismo de reparación”. También cabe destacar que tanto la turbidez como los sólidos suspendidos totales en el agua residual hacen que la desinfección con luz UV sea ineficaz. (EPA, 1999). De manera que observando los resultados obtenidos en los efluentes de la EDAR A y la EDAR B, el sistema de desinfección con luz ultravioleta no sería la mejor opción.

En la Tabla 21 se sintetizan las ventajas y desventajas de cada uno de los sistemas de desinfección explicados:

Tabla 21. Aspectos positivos y negativos de los sistemas de desinfección

MÉTODO	ASPECTOS POSITIVOS	ASPECTOS NEGATIVOS
CLORACIÓN	<ul style="list-style-type: none"> · Bajo coste. · Fácil aplicación. · Mantenimiento de la actividad tras el tratamiento (cloro residual). · Eliminación de microorganismos, sólidos en suspensión, materia orgánica y nitrógeno. · Oxidación de contaminantes inorgánicos. 	<ul style="list-style-type: none"> · Genera subproductos altamente tóxicos. · Es corrosivo para materiales. · El olor y sabor del cloro puede permanecer en el agua.
OZONIZACIÓN	<ul style="list-style-type: none"> · Acción rápida. · Eliminación eficaz de microorganismos. · Eliminación de sólidos en suspensión y materia orgánica además de olores y sabores del agua. · Oxidación de contaminantes inorgánicos. · No genera subproductos peligrosos. · Inodoro e insípido. 	<ul style="list-style-type: none"> · Caro de aplicar. · La generación debe ser “in situ” · Poco poder residual. · Necesita gran cantidad de energía. · Formación de subproductos en aguas con concentraciones de bromuros superiores a 0,10 mg/L.
RADIACIÓN ULTRAVIOLETA	<ul style="list-style-type: none"> · Eficaz para la eliminación de microorganismos. · Rápido y de uso fácil para los operadores. · No existe ningún efecto residual que pueda perjudicar. · Requiere poco espacio. · No necesita productos químicos tóxicos, peligrosos o corrosivos. 	<ul style="list-style-type: none"> · Menos económica. · La turbidez y los sólidos suspendidos totales disminuyen la eficacia. · La baja dosificación puede no desactivar de manera efectiva algunos microorganismos o tras el tratamiento invertir los efectos destructivos.

Por último, atendiendo a procedimientos experimentales llevados a cabo con anterioridad por alumnos de la Escuela Politécnica Superior de Huesca (EPSH), los porcentajes de reducción obtenidos tras la aplicación de los tratamientos de desinfección son los siguientes (Laborda, 2013):

Tabla 22. Porcentajes de reducción obtenidos tras la desinfección

PARÁMETRO	CLORACIÓN	OZONIZACIÓN	RADIACIÓN UV
<i>Escherichia coli</i>	99,66%	98,44%	99,99%
Coliformes totales	100%	91%	99,99%
Huevos de nematodos	100%	100%	100%
DQO	69,34%	52,67%	-
Nitratos	69,77%	44%	-
Fósforo	42%	13%	-
Sólidos en suspensión	68,64%	63,82%	-

5. CONCLUSIONES

- Evolución de parámetros físico-químicos y microbiológicos a lo largo de la línea de aguas de las EDAR objeto de estudio

El efluente de las EDAR objeto de estudio presentan valores altos de algunos parámetros, es decir, situados por encima del máximo permitido, impidiendo así su reutilización sin previo tratamiento, según el RD 1620/2007.

Las aguas de salida de las EDAR objeto de estudio poseen valores elevados de sólidos en suspensión, turbidez y gran variedad de gérmenes patógenos.

Se detectan altas concentraciones en los parámetros microbiológicos analizados en el efluente: huevos de nemátodos, coliformes totales y *Escherichia coli* y *Enterococcus faecalis*. De hecho, las concentraciones de huevos de nematodos y *Escherichia coli* sobrepasan el nivel legislado por el RD 1620/2007 en las EDAR donde no se lleva a cabo un tratamiento adicional.

Tanto el pH como la temperatura son dos parámetros que se mantienen prácticamente constantes durante todo el proceso depurativo. Esto es debido a que el agua residual se mantiene a temperatura ambiente, de manera que no sufre alteraciones relevantes, y el pH no es necesario ajustarlo en ninguna de las etapas que forman la línea de tratamiento.

El oxígeno disuelto aumenta en aquellos procesos que cuentan con un sistema de aireación, como ocurre en los fangos activos y los lechos bacterianos. De no ser así, la degradación de la materia orgánica en los tratamientos biológicos no sería posible puesto que los microorganismos encargados de esa labor necesitan tanto oxígeno como nutrientes para realizar su labor depurativa.

Destacar la importancia que tiene mantener en equilibrio a los principales nutrientes: el fósforo y el nitrógeno, elementos necesarios para el sustento de los tratamientos biológicos. Es por ello que tras el paso del agua residual urbana por los lechos bacterianos o los fangos activos, la concentración de dichos parámetros disminuye notablemente, puesto que son consumidos por los microorganismos encargados de la degradación de la materia orgánica presente.

En cuanto al nitrógeno y sus diversas formas, se observa cómo en el tratamiento de fangos activos debido a la aireación, se genera una aceleración de la desnitrificación de manera que los nitratos presentes en el agua pasan a nitrógeno atmosférico. Por otro lado, como consecuencia de la acción bacteriana, este nutriente va cambiando de forma a lo largo de la línea de aguas.

La materia orgánica es eliminada en los tratamientos biológicos, especialmente en el reactor anóxico de la EDAR B, donde se registra un descenso del 97% en la DQO y un 96% en el carbono orgánico disuelto.

Los sólidos en suspensión y la turbidez son parámetros que registran sus descensos más relevantes tras el tratamiento primario donde tiene lugar la decantación puesto que se trata de un tratamiento físico destinado principalmente a la eliminación de sólidos en suspensión.

- Sistemas de depuración

Los reactores biológicos generan un crecimiento sustancial de los microorganismos presentes en el agua residual. Por el contrario, disminuye notablemente las concentraciones tanto de materia orgánica como de nutrientes retirando así una buena parte de la carga contaminante.

La instalación de un reactor anóxico tras el pretratamiento en lugar de un decantador primario supone una ventaja. Tras el paso del agua residual por urbana por dicho tratamiento biológico se observa una importante disminución de nutrientes, de materia orgánica e incluso de sólidos en suspensión. De este modo la carga contaminante queda reducida notablemente y facilita el trabajo al resto de los procesos depurativos de la línea de aguas.

Los tratamientos biológicos de lechos bacterianos y fangos activos implican una fuerte disminución de materia orgánica. Destacar que el buen funcionamiento del decantador situado a continuación, es igual de importante para que el proceso sea eficaz y no genere un aumento drástico de turbidez y sólidos en suspensión.

El sistema de lagunas como tratamiento terciario o de afino natural implica un importante descenso de la concentración de agentes patógenos, realizando así una labor desinfectante. Además, también elimina la turbidez presente en el agua debido al elevado tiempo de retención, favoreciendo la decantación de la materia en suspensión.

Atendiendo a la disposición de los tratamientos de las 3 EDAR se destaca lo siguiente: la combinación de lechos bacterianos con lagunas de maduración a modo de tratamiento terciario, supone una mayor reducción de la concentración de ciertos parámetros, que la implantación de dos etapas de filtros percoladores. También implica una importante disminución de contaminantes la instalación de un reactor biológico previo al resto de procesos puesto que elimina un alto porcentaje de la carga contaminante presente en el agua residual, principalmente de nutrientes y de materia orgánica.

Los mejores porcentajes de reducción obtenidos son los siguientes:

- Materia orgánica: la EDAR B gracias a la instalación de un reactor anóxico a modo de tratamiento primario logra reducir prácticamente en su totalidad la materia orgánica presente en el agua residual urbana. Destacar que la EDAR A, debido al sistema de lagunas también logra unos valores positivos.

- Sólidos en suspensión y turbidez: la EDAR C integrada por tres decantadores entre a lo largo de la línea de tratamiento consigue eliminar un 98% de los sólidos en suspensión y un 95% de la turbidez presente en el agua residual.

- Nutrientes: nuevamente es la EDAR B con su reactor anóxico la planta de tratamiendo que reduce en mayor medida las concentraciones de fósforo y nitrógeno con una eliminación del 97% del fósforo y el 77% de los nitratos.

- Microorganismos: el poder desinfectante del sistema de lagunas utilizado por la EDAR A, supone la mayor disminución de agentes patógenos presentes en el agua tratada.

- Reutilización

Los parámetros que limitan en mayor medida la capacidad de un efluente para ser reutilizado sin necesidad de tratamientos terciarios son los sólidos en suspensión y la concentración de microorganismos, *Escherichia coli* principalmente.

Sin someter el efluente de las 3 EDAR objeto de estudio a ningún tratamiento adicional, solamente podría ser reutilizado el de la EDAR C. A pesar de ello, el único uso posible sería para usos ambientales, concretamente el punto 5.3, riego de bosques, zonas verdes y silvicultura. El resto de las aguas de salida de planta no pueden ser reutilizadas sin utilizar ningún tratamiento de regeneración.

En la EDAR A es necesario reducir la concentración de sólidos en suspensión principalmente para reutilizar el agua con fines agrícolas, industriales, recreativos y ambientales.

En la EDAR B se precisa una disminución de *Escherichia coli* principalmente y de sólidos en suspensión. De este modo los posibles usos serían agrícolas, industriales y recreativos.

Los tratamientos de regeneración propuestos con el fin de disminuir la concentración de sólidos en suspensión y de *Escherichia coli* (y como consecuencia de la turbidez y de los huevos de nematodos) sería un proceso de filtros de arena y otro que actúe de desinfectante, como la cloración.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Aplicación de la ozonización en el tratamiento de aguas: descripción y funcionamiento. Blogs Madrid. www.madrimasd.org/blogs (En línea el 10 de junio de 2015).
- Asano T., Mujeriego R. (1994). *Water Quality Guidelines for Wastewater Reuse*. Comunicaciones de las Jornadas Técnicas Biosólidos y aguas depuradas como recursos. Consorcio de la Costa Brava. Girona
- AYRES, R.M & DUNCAN MARA, D. (1996) *Análisis de aguas residuales para su uso en agricultura. Manual de técnicas parasitológicas y bacteriológicas de laboratorio*. Organización Mundial de la salud, Ginebra.
- Biblioteca virtual – FUNDESYRAM. (2013). *Filtración lenta de arena*. Bolivia. Disponible en: www.fundesyram.info (En línea el 20 de Mayo de 2015).
- BIOLOGÍA SUR, Impactos sobre la biosfera. Autodepuración. Disponible en: www.biologiasur.org (En línea el 2 de Abril de 2015).
- *California Wastewater Reclamation Criteria*. California Code of Regulations, 2001.
- Catalán Lafuente, J. (1981). *Química del agua*. Madrid.
- Catalán Lafuente, J., Catalán Alonso, J.M. (1987). *Ríos, caracterización y calidad de sus aguas*. Zamora: Dihidrox.
- Catalán Lafuente, J.G., Oliver Clapés, B., Alonso Pascual, J.J. (1971). *Estudio hidrológico del río Llobregat*. Comité Asesor y de Estudios del Abastecimiento de Agua a Barcelona y el Centro de Estudios, Investigación y Aplicaciones del Agua
- CEDEX (2008). *Realización de una base de datos sobre los sistemas de reutilización de aguas depuradas en España*. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas. Madrid. Gobierno de España, España.
- Cerezo Castro, J.A. *Estación depuradora de aguas residuales*. Proyecto Fin de Carrera. Departamento de Ingeniería Química de la Universidad Politécnica de Cataluña. Junio 2011.
- Claros Bedoya J.A. (2009). *Estudio del proceso de nitrificación y desnitrificación vía nitrato para el tratamiento biológico de corrientes de agua residual con alta carga de nitrógeno amoniacal*. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos. Politécnica de Valencia.
- Desarrollos tecnológicos hacia el ciclo urbano del agua autosostenible (SOSTAQUA). (2010). Nuevos sistemas de eliminación de la materia orgánica en aguas residuales depuradas. Disponible en: www.sostaqua.com (En línea el 10 de Junio de 2015).

- Díez_Baez M.C., Bustos López M.C., Espinosa Ramírez A.J. (2004). *Pruebas de toxicidad acuática: fundamentos y métodos*. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- Directiva 91/271/CEE del Consejo de la Unión Europea de 21 de mayo de 1991 sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas. DOCE n° L135, de 30/05/91.
- Eaton, A.D.; Clesceri, L.S.; Rice, W.E.; Greenberg, A.E. (2005): "*Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*". 21st Edition. American Public Health Association (APHA), American Water Works Association (AWWA) & Water Environment Federation (WEF).
 - Method 4500 H⁺ - B: "Determination of pH. Electrometric method"
 - Method 5220 D: "Determination of Chemical Oxygen Demand. Closed reflux, colorimetric method".
 - Method 5310 B: "Determination of Total Organic Carbon. High-temperature, combustion method".
 - Method 4500-P D: "Determination of Phosphorus. Stannous chloride method".
 - Method 4500-NO₂⁻ B: "Determination of nitrite. Colorimetric method".
 - Method 4500-NO₃⁻ B: "Determination of nitrate. Ultraviolet spectrophotometric screening method".
 - Method 4500-NH₃⁻ C: "Determination of ammonia. Titrimetric method".
 - Method 2540 D: "Determination of solids. Total suspended solids dried at 103-105°C"
 - Method 2540 E: "Determination of solids. Fixed and volatile solids ignite at 550°C"
 - Method 2540 G: "Determination of solids. Total, fixed, and volatile solid and semisolid samples".
 - Method 9215 C: "*Determination of microbiological examination. Spread Plate Method*"
- Environmental Protection Agency (EPA), 2005.
- Environmental Protection Agency, (1999). "*Folleto informativo de tecnología de aguas residuales. Desinfección con cloro*". EPA 832-F-99-062. United States.
- Environmental Protection Agency, (1999). "*Folleto informativo de tecnología de aguas residuales. Filtros Intermitentes de Arena*". EPA 832-F-99-067. United States.
- Environmental Protection Agency, (1999). "*Folleto informativo de tecnología de aguas residuales. Desinfección con ozono*". EPA 832-F-99-063. United States.
- Environmental Protection Agency, (1999). "*Folleto informativo de tecnología de aguas residuales. Desinfección con luz ultravioleta*". EPA 832-F-99-064. United States.
- EUROZON Tratamiento de Agua con Ozono. Página web www.eurozon.com (En línea el 10 de mayo de 2015).
- Gamazo C., López-Goñi I., Díaz R. (2005). *Manual práctico de microbiología*. Barcelona: Masson

- Gobierno de Aragón. Departamento de Agricultura, Ganadería y Medio Ambiente. Secretaría General Técnica. *Medio Ambiente en Aragón*. Informe 2011. Aragón, España.
- Gobierno de España. Ministerio de Educación, Cultura y Deporte. Banco de imágenes y sonido. Disponible en: <http://recursostic.educacion.es> (En línea el 2 de Mayo de 2015).
- González Delgado, M. N. *et al.* (2003). *Contaminación ambiental. Una visión desde la química*. Madrid: Paraninfo
- Henry J.G., Heinke G.W. (1999). *Ingeniería ambiental*. México: Prentice Hall
- Hernando, M.D.; Malato, O.; Farré, M.; Fernández-Alba, A.R.; Barceló, D. *Application of ring study: Water toxicity determinations by bioluminescence assay with Vibrio fischeri*. Talanta, 2006.
- HIDRITEC, Tratamiento de Aguas Residuales y disminución de DQO. Disponible en: www.hidritec.com (En línea el 18 de Abril de 2015).
- INGECONSERSA, INGENIERÍA, CONSTRUCCIONES Y SERVICIOS, Tratamiento de aguas residuales mediante lodos activados. Disponible en: www.iconsersa.com (En línea el 18 de Abril de 2015).
- Instituto Aragonés del Agua. Gobierno de Aragón. Zaragoza.
- INSTITUTO NACIONAL DE ECOLOGÍA Y CAMBIO CLIMÁTICO (INECC). (2009). *Metales Pesados*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales de México.
- Jordán, Y. (2008). *“Regeneración de aguas residuales urbanas para su reutilización”*. Postgrado de Ingeniería de los Recursos Hídricos.
- Katsoyiannis and Samara, (2006): *“Persistent organic pollutants (POPs) in the sewage treatment plant of Thessaloniki, Northern Greece: occurrence and removal”*. Water Research. Volume 38.
- Kuster, M.; Lopez de la Alda, M.J.; Hernando, M.D.; Petrovic, M.; Mantín-Alonso, J.; Barceló, D. (2008): *“Analysis and occurrence of pharmaceuticals, estrogens, progestogens, and polar pesticides in sewage treatment plant effluents, river water and drinking water in the Llobregat river basin (Barcelona, Spain)”*. J. Hydrology. Volume 358.
- Labora, E. (2013). *Estudio para la reutilización del efluente de una estación depuradora de aguas residuales en el riego de maíz*. Trabajo Fin de Grado. Escuela Politécnica Superior de Huesca.
- Lázaro, P. *Regeneración de aguas depuradas mediante procesos físico-químicos y desinfección convencional*. Proyecto Fin de Carrera. Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Industrial de Zaragoza, 2008.

- López, A. (2010). *Aplicación de procesos convencionales en la regeneración de aguas depuradas: eliminación de contaminantes peligrosos*. Proyecto Fin de carrera. Centro Politécnico Superior. Universidad de Zaragoza. Junio 2010
- Madigan M.T., Martinko J. M., Parker J. 2003. Brock Biología de los Microorganismos. Ed. Pearson Educación S.A, 10ª Ed.
- Merli, G.F. *et al.* (2009). Seminario de Procesos Fundamentales Físico-Químicos y Microbiológicos. Laboratorio de Química, Facultad Regional Bahía Blanca. Editorial de la Universidad Tecnológica Nacional.
- Metcalf and Eddy, (2006). *Water Reuse*. McGraw-Hill Companies, New York.
- Metcalf y Eddy, (1977). *Tratamiento y depuración de las aguas residuales*. 2ª ed. Editorial Labor.
- Metcalf y Eddy, Inc. (1995). *Ingeniería de Aguas Residuales. Tratamiento, Vertido y Reutilización*, 3ª ed. McGraw-Hill Companies, New York.
- Ministerio de Medio Ambiente, Secretaría de Estado de Aguas y Costas (2000). *“Libro Blanco del Agua en España”*. Dirección General de Obras Hidráulicas y Calidad de las Aguas. Centro de Publicaciones.
- Ministerio de Medio ambiente. *Programa A.G.U.A.* 2008. Disponible en: <http://hisagua.cedex.es> (En línea el 4 de Abril de 2015).
- Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente. (1996). Manual de procedimientos analíticos para aguas y efluentes. Laboratorio de Dirección Nacional de Medio Ambiente.
- Monográficos de Agua en Centroamérica. *Manual de depuración de aguas residuales urbanas*. Alianza por el Agua. Fundación Ecología y Desarrollo.
- Mosteo R., Ormad M.P., Goñi P., Rodríguez-Chueca J., García A., Clavel A. (2013). *“Identification of pathogen bacteria and protozoa in treated urban wastewaters discharged in the Ebro River (Spain): Water reuse possibilities”*. Water Science and Technology.
- Mujeriego, R. “La reutilización planificada del agua. Aspectos reglamentarios, sanitarios, técnicos y de gestión”. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona.
- Organización Mundial de la Salud. (1989). *Health Guidelines for the Use of Wastewater in Agriculture and Aquaculture*. Serie de Documentos Técnicos . Ginebra, Suiza.
- Prats, D. (2011). *Conceptos generales sobre reutilización. Calidad del agua y usos posibles*. Catedrático de Ingeniería Química de la Universidad de Alicante. España.
- Ramalho R.S. (1991). *Tratamiento de aguas residuales*. Barcelona, España. Editorial Reverte

- Real Decreto 508/2007 por el que se regula el suministro de información sobre las emisiones del Reglamento E-PRTR y de las autorizaciones ambientales integradas.
- Real Decreto 1620/2007, de 7 de diciembre, por el que se establece el régimen jurídico de reutilización de las aguas depuradas. Boletín Oficial del Estado, 8 de diciembre de 2007, núm. 294.
- Reglamento Técnico para el sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS).
- *Revista ambientum*. Autodepuración de los ríos. Edición marzo 2002. Disponible en: www.ambientum.com (En línea el 13 de Marzo de 2015).
- *Revista ambientum*. Nitrógeno en el agua. Edición febrero 2002. Disponible en: www.ambientum.com (En línea el 10 de Abril de 2015)
- Sainz Sastre, J.A. (2005). *Tecnologías para la sostenibilidad. Procesos y operaciones unitarias en depuración de aguas residuales*. Colección EOI Medio Ambiente. Escuela de Organización Industrial, España.
- Seguí, L. (2004). *Sistemas de Regeneración y Reutilización de Aguas Residuales. Metodología para el Análisis Técnico-Económico y Casos*. Tesis Doctoral. Departamento de Ingeniería Agroalimentaria y Biotecnología. Universidad Politécnica de Cataluña.
- Sereviche Sierra C.A., Castillo Bertel M.E., Acevedo Barrios R.L. (2013). *Manual de Métodos Analíticos para la Determinación de Parámetros Físico-químicos Básicos en Aguas*. Cartagena de Indicas, Colombia. Editado por la Fundación Universitaria Andaluza Inca Garcilaso para eumed.net.
- Simón Andreu, P., Lardín Mifsut, C., Pacheco Ballarín S. *Recuento e identificación de huevos de helmintos en aguas residuales urbanas de la región de Murcia*. Entidad de Saneamiento y Depuración de la Región de Murcia (ESAMUR).
- Tortora, G.J.; Funke, B.R.; Case C.L. (2007). *Introducción a la microbiología*. 9ª Edición. Buenos Aires: Panamericana.
- Tortora G.J., Funke B.R., Case C.L. 2007. *Introducción a la microbiología*. Ed. Médica Paramericana, 9ª Ed
- Trapote Jaume, A. (2011). *Depuración de aguas residuales urbanas*. Publicaciones de la Universidad de Alicante. Alicante.
- U.S. Environmental Protection Agency. (2004). *Guideline of water reuse*.
- UNE ISO 16649-1:2013. Microbiología de los alimentos para consumo humano y animal. Método horizontal para la enumeración de *Escherichia coli* beta-glucuronidasa positivo. Parte 1: Técnica de recuento de colonias a 44°C utilizando membranas y 5-bromo-4-cloro-3-indolil beta-D-glucurónido.

- UNE-EN 25814:1994. Calidad del agua. Determinación del oxígeno disuelto. Método electroquímico.
- UNE-EN 27888:1994. Calidad del agua. Determinación de la conductividad eléctrica.
- UNE-EN ISO 19458:2007. Calidad del agua. Muestreo para el análisis microbiológico.
- UNE-EN ISO 5667-1:2007. Calidad del agua. Muestreo Parte 1: Guía para el diseño de los programas de muestreo y técnicas de muestreo
- UNE-EN ISO 5667-13:2011. Calidad del agua. Muestreo Parte 13: Guía para el muestreo de lodos
- UNE-EN ISO 5667-15:2010. Calidad del agua. Muestreo Parte 15: Guía para la conservación y manipulación de muestras de lodo y sedimentos
- UNE-EN ISO 5667-3:2012. Calidad del agua. Muestreo Parte 3: Conservación y manipulación de las muestras de agua
- UNE-EN ISO 6887-1:2004. Microbiología de los alimentos para consumo humano y animal. Preparación de las muestras de ensayo, suspensión inicial y diluciones decimales para examen microbiológico. Parte 1: Reglas generales para la preparación de la suspensión inicial y de las diluciones decimales
- UNE-EN ISO 7027:2001. Calidad del agua. Determinación de la turbiedad.
- UNE-EN ISO 7899-2:2011. Calidad del agua. Detección y recuento de enterococos intestinales. Parte 2: Método de filtración de membrana.
- UNE-EN ISO 9308-1:2001. Calidad del agua. Detección y recuento de *Escherichia coli* y de bacterias coliformes. Parte 1: Método de filtración en membrana.
- United States Environmental Protection Agency and United States Agency for International Development. (1992): "*Guidelines for Water Reuse*". Municipal Support Division Office of Wastewater Management Office of Water. Washington DC, United States.
- WHO. "WHO Guidelines for the Safe use of wastewater, excreta and greywater". World Health Organization, 2006.

7. ANEXOS

ANEXO I. DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA ANALÍTICA DE LOS PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICA

I.I. pH

Para determinar el pH de las muestras acuosas en el laboratorio se utiliza un pH-metro marca CRISON, modelo GLP 21, previamente calibrado con disoluciones tampón de pH 7'00 y 4'01. La metodología empleada se basa en el método estándar 4500-H⁺ B (Eaton et al, 2005) y consiste en introducir la sonda en la muestra y esperar hasta que el valor se estabilice.

La determinación realizada en el campo se hace con tiras indicadoras. Simplemente se sumergen por un instante en la muestra de agua, lo que provoca un cambio de color que posteriormente se compara con el patrón de coloración impreso en la caja del kit asignando así un pH.

I.II. Conductividad y temperatura

Su determinación se realiza in situ en base a la UNE-EN 27888 y utilizando un conductímetro portátil HANNA modelo HI 9033, provisto de una célula de dos electrodos. Para conocer la conductividad y temperatura de una muestra se introduce la célula en ella, se agita y se espera unos segundos antes de tomar el valor. Los resultados se expresan en mS/cm o en $\mu\text{S}/\text{cm}$, según el rango de trabajo y en °C.

I.III. Oxígeno disuelto

La determinación del oxígeno disuelto se lleva a cabo in situ mediante un dispositivo portátil (HANNA 9146N) en base a la UNE-EN 25814 (AENOR, 1994). Para conocer la concentración de oxígeno de la muestra, se introduce la sonda en ella y se espera unos segundos hasta que el valor se estabilice.

I.IV. Turbidez

Para medir este parámetro se utiliza un turbidímetro Hanna LP 2000 (error ≤ 0.2 NTU) y el método seguido para su determinación se en la UNE-EN ISO 7027 (AENOR, 1994). Previamente a la medida, es necesario realizar la calibración del instrumento con agua desionizada. A continuación se vierte la muestra en un vial, se cubre con un tapón para protegerlo de la luz, y se introduce en el turbidímetro.



Figura 45. Turbidímetro HANNA LP 2000. Fuente: Elaboración propia

I.V. DQO

Este parámetro se determina mediante una adaptación del método 5220 D (Eaton et al, 2005), en un fotómetro multiparámetro marca *Hanna Instruments*, modelo *HI 83099*.

El método se basa en que los compuestos orgánicos oxidables reducen el ión dicromato (naranja) a ión cromo (III) (verde). De manera que, determinando la cantidad de cromo formada, se obtiene el valor de la DQO.

El procedimiento consiste en añadir un volumen de muestra de 2 o 0,2 ml (en función de la concentración esperada) en un vial que contiene ión dicromato. A continuación, se introducen los viales con la muestra en un reactor a 150°C durante 2 horas. Tras el paso por el reactor se deja reposar a los viales durante 20 minutos hasta que toman una temperatura de unos 120°C aproximadamente. Después se voltean y se colocan en una rejilla hasta alcanzar la temperatura ambiente. Finalmente, sin agitar, se introducen en el fotómetro obteniendo así la medida.



Figura 46. Fotómetro multiparamétrico HANNA 83099 y reactor HANNA 839800. Fuente: HANNA INSTRUMENTS

I.VI. COD

Se mide de acuerdo al método estándar 5310B (Eaton et al, 2005). Para ello se utiliza un equipo SHIMADZU, modelo TOC-Vcsh.



Figura 47. Analizador de Carbono Orgánico Total SHIMADZU, modelo TOC-Vcsh. Fuente: Elaboración propia

El fundamento del equipo residen en que en el agua están presentes dos tipos de carbono: carbono orgánico y carbono inorgánico. El carbono orgánico (COT) corresponde a los compuestos orgánicos, mientras que el carbono inorgánico (CI) se encuentra disuelto en el agua como CO_2 , o bien en forma de compuestos inorgánicos tales como los carbonatos y bicarbonatos. Conjuntamente, ambos tipos de carbonos constituyen el carbono total, CT, y por lo tanto cumplen la relación: $\text{COT} = \text{CT} - \text{CI}$. El equipo utilizado se basa en esta relación para medir las diferentes formas de carbono.

Para introducir la muestra en el equipo, se filtra el agua a analizar utilizando un filtro de $0.45\mu\text{m}$ para no obstruir la aguja de inyección. Una vez filtrada la muestra se introduce en los viales de 50 mL y se programa el equipo con las rectas de calibrado que mejor se ajusten, según los valores esperados.

I.VII. Fósforo total

Su determinación se ha llevado a cabo mediante un fotómetro multiparamétrico (HANNA 83099), y siguiendo el método estándar 4500-P D (Eaton et al, 2005), en un rango de 0-15 mg/L. El procedimiento está marcado por la guía del fotómetro. En este caso se toman 10 ml de muestras en un vial y se añaden dos reactivos, uno líquido y otro en polvo que debe disolverse por completo, que provocan que la muestra tome un color azul. De este modo el fotómetro obtiene la concentración de fósforo presente en la muestra.

Destacar que antes de cada medida se introduce un blanco del agua residual urbana pero sin reactivos. De este modo, el fotómetro tiene en cuenta la diferencia entre la colorimetría que tiene la muestra de por sí y la que adquiere tras la adición de los reactivos, evitando posibles errores en los resultados

I.VIII. Nitritos

El procedimiento utilizado para su determinación es una adaptación del método 4500-NO₂- B (Eaton et al, 2005), utilizando para ello un fotómetro multiparamétrico (HANNAH 83099). Nuevamente, el procedimiento está marcado por la guía del fotómetro. Se toman 10 ml de muestras en un vial y se añade el reactivo. Tras disolver el reactivo, el vial está preparado para que el fotómetro analice la concentración de nitritos presente en la muestra.

En este caso también es necesario realizar un blanco antes de analizar cada muestra.

I.IX. Nitratos

La metodología utilizada para su determinación se basa en el método 4500-NO₃⁻ B o C (Eaton et al, 2005), utilizando para ello un fotómetro multiparamétrico (HANNAH 83099). Nuevamente, el procedimiento está marcado por la guía del fotómetro. EN este caso se toman 6 ml de muestras en un vial y se añade el reactivo. Tras agitarlo durante 10 segundos y hacerlo girar durante 50, el vial se introduce en el fotómetro para que este analice la concentración de nitratos de la muestra.

En este caso también es necesario realizar un blanco antes de analizar cada muestra.

I.X. Nitrógeno amoniacal

La determinación del nitrógeno amoniacal se lleva a cabo mediante un electrodo selectivo de sobremesa, marca Crison, modelo GLP22. El método empleado es una adaptación del método estandarizado 4500 NH₃ C (Eaton et. al, 2005).



Figura 48. Analizador de Nitrógeno Amoniacal CRISON, modelo GL22. Fuente: CRISON

El procedimiento consiste en introducir 25 ml de muestra con 5 ml del reactivo que permite al aparato detectar exclusivamente nitrógeno amoniacal. A continuación se homogeniza la mezcla lentamente con ayuda de un agitador magnético de manera que no se produzca la

evaporación del nitrógeno presente. Por último se introduce el electrodo y se toma la medida una que el valor se estabilice.

I.XI. Sólidos en suspensión

El procedimiento utilizado para su determinación está basado en el método estandarizado 2540 D (Eaton et al, 2005) y es el siguiente:

El agua residual urbana se analiza a temperatura ambiente y se agita con el fin de obtener una suspensión homogénea que sea representativa. Se utiliza un filtro de 45 µm. Dicho filtro se seca previamente a 103-105 °C y se deja enfriar a temperatura ambiente en un desecador. Una vez exento de humedad, se pesa y se coloca encima de sistema de filtrado y se le añade un volumen conocido de la muestra de agua residual, ayudándose del vacío para agilizar el proceso.

Una vez que ha pasado toda el agua, el filtro con los sólidos retenidos se lleva a la estufa a 103-105 °C durante 2 horas, para evaporar la humedad que contenga, y se deja en el desecador hasta temperatura ambiente. Por último se pesa en la balanza hasta que el valor permanece estable.

Los sólidos en suspensión se calculan con la siguiente fórmula:

$$\text{Sólidos en suspensión} = \frac{(A-B) \cdot 1000}{V} \text{ mg/l}$$

Donde:

A = Peso del filtro con los sólidos en suspensión, en gramos.

B = Peso del filtro vacío, en gramos.

V = volumen de la muestra, en litros.

I.XII. Sólidos en suspensión volátiles

Su determinación se ha llevado a cabo siguiendo el método estandarizado SM 2540 E (Eaton et al, 2005). El procedimiento realizado consiste en, al igual que en la determinación de sólidos en suspensión, filtrar un volumen de agua residual urbana que sea representativo de la muestra. Se utiliza un filtro de 45 µm. Dicho filtro se deposita en un crisol y se calcina a 550 °C. Luego se deja enfriar a temperatura ambiente en un desecador con el fin de obtener el peso de un blanco, es decir, el peso de un filtro calcinado sin sólidos retenidos en él.

A continuación, se coloca otro filtro de las mismas características sobre un sistema de filtrado y se le añade un volumen conocido de la muestra de agua residual, ayudándose del vacío para agilizar el proceso. Una vez que ha pasado toda el agua, el filtro con los sólidos retenidos se lleva a la mufla a 550 °C durante una hora, hasta calcinar el filtro, y se deja en el desecador hasta temperatura ambiente. Por último se pesa en la balanza hasta que el valor permanece estable.

Los sólidos en suspensión volátiles se calculan con la siguiente fórmula:

$$\text{Sólidos en suspensión volátiles} = \frac{(A-B) \cdot 1000}{V} \text{ mg/l}$$

Donde:

A = Peso del filtro calcina en un crisol con los sólidos en suspensión, en gramos.

B = Peso del filtro vacío calcinado sobre un crisol, en gramos.

V = Volumen de la muestra, en litros.

I.XIII. Sólidos totales

La metodología utilizada se basa en el método estandarizado 2540 G (Eaton et al, 2005). Consiste en verter un volumen de agua residual urbana conocido y representativo de la muestra en un recipiente de vidrio capaz de soportar altas temperaturas. A continuación dicho recipiente con la muestra se meten en la estufa a 103-105°C hasta que se evapora el agua en su totalidad. Previamente el recipiente es pesado para poder conocer el peso de los sólidos que contiene la muestra.

Los sólidos totales se calculan con la siguiente fórmula:

$$\text{Sólidos totales} = \frac{(A-B) \cdot 1000}{V} \text{ mg/l}$$

Donde:

A = Peso del recipiente con los sólidos presentes en la muestra, en gramos.

B = Peso del recipiente vacío, en gramos.

V = Volumen de la muestra, en litros.

ANEXO II. RESULTADOS

II.I. RESULTADOS DEL ANÁLISIS FÍSICO QUÍMICO Y MICROBIOLÓGICO DE LA EDAR A

Tabla 23. Resultados del análisis físico-químico de la EDAR A

MUESTRA	pH	Conductividad (μS/cm)	O ₂ disuelto (ppm) Temperatura (°C)	Turbidez (NTU)	DQO (mgO ₂ /l)	COD (mg/l)	Fósforo (mg/l)	Nitratos (mg/l)	Nitritos (mg/l)	N amoniacal (mg/l)	SS (mg/l)	SSV (mg/L)
M6	7,5	1900	4,03 13	149,5	1171	234,05	6	9,5	30	102,8	255	560
M5	7	1966	2,98 14	100	520	99,64	3,9	9,9	0	82,7	80	<
M4	7,5	1900	6,63 12,4	30,84	72	26,75	3,1	13,9	14	14,2	35	330
M3	7,5	2200	1,93 12,3	7,77	32	16,17	3,4	20	13	22,8	50	460
M2	7,5	2700	5,8 12,8	2,41	46	15,28	4,5	16,67	41	15,6	35	190
M1	7,5	950	2,86 16	2,18	42	14,13	3,3	14,25	48,5	13,7	40	<

Tabla 24. Resultados del análisis microbiológico de la EDAR A

MUESTRA	Coliformes totales (UFC/100ml)	<i>Escherichia coli</i> (UFC/100ml)	Enterococos (UFC/100ml)	Huevos de nematodos
M6	2,17E+08	3,00E+06	4,80E+06	-
M5	1,18E+08	2,00E+06	2,80E+06	-
M4	2,06E+07	8,00E+05	1,58E+05	-
M3	1,89E+06	<1E+04	>300	-
M2	1,92E+05	2,00E+04	1,45E+02	-
M1	2,60E+04	1,00E+03	2,50E+02	Presencia

II.II. RESULTADOS DEL ANÁLISIS FÍSICO QUÍMICO Y MICROBIOLÓGICO DE LA EDAR B

Tabla 25. Resultados del análisis físico-químico de la EDAR B

MUESTRA	pH	Conductividad (µS/cm)	O ₂ disuelto (ppm) Temperatura (°C)	Turbidez (NTU)	DQO (mgO ₂ /l)	COD (mg/l)	Fósforo (mg/l)	Nitratos (mg/l)	Nitritos (mg/l)	N amoniacal (mg/l)	SS (mg/l)	SSV (mg/L)
M1	7,5	1841	5 17,8	135	1447	362,65	8,2	104,2	44,5	52,3	85	70
M2	7	1061	1,6 15	22,4	49	13,03	6,0	0	32,6	20,6	20	90
M3	6,5	1034	4,71 14,4	34,3	66	9,28	1,4	0,45	34,5	1,5	50	-
M4	7,5	1132	8,23 14,7	8,3	54	9,67	0,65	19	37,5	1,25	40	<
M5	7	1023	7,49 14,2	8,4	35	9,31	0,25	24,1	25,33	0,85	40	<

*M2 (agua fangosa): Sólidos Totales 6,98 g/L

Tabla 26. Resultados del análisis microbiológico de la EDAR B

MUESTRA	Coliformes totales (UFC/100ml)	<i>Escherichia coli</i> (UFC/100ml)	Enterococos (UFC/100ml)	Huevos de nematodos
M1	1,97E+07	3,35E+06	5,70E+06	-
M2	1,17E+08	2,87E+06	1,22E+07	-
M3	3,63E+08	6,80E+06	5,74E+06	-
M4	3,41E+05	6,65E+04	4,20E+04	-
M5	6,00E+05	1,10E+05	5,90E+04	Presencia

II.II. RESULTADOS DEL ANÁLISIS FÍSICO QUÍMICO Y MICROBIOLÓGICO DE LA EDAR C

Tabla 27. Resultados del análisis físico-químico de la EDAR C

MUESTRA	pH	Conductividad (μS/cm)	O ₂ disuelto (ppm) Temperatura (°C)	Turbidez (NTU)	DQO (mgO ₂ /l)	COD (mg/l)	Fósforo (mg/l)	Nitratos (mg/l)	Nitritos (mg/l)	N amoniacal (mg/l)	SS (mg/l)	SSV (mg/L)
M7	7.5	1870	2.48 16	166.5	180	62.92	2.25	37.1	48	42.8	300	570
M6	7.5	2070	2.04 14.5	215	120	41.25	1.8	5.5	50	66	515	200
M5	7.5	2820	0 14.4	96	270	92.04	3.2	8.6	42	153.3	25	<
M4	7.5	2500	4.99 14.4	72	90	32.59	2.1	6.0	59	77.6	70	<
M3	7.5	2060	4.02 15	26.75	53	20.61	1.65	11.3	45	22.85	15	50
M2	7.5	2150	5.92 13.9	22.68	55	19.45	1.4	30.6	16	3.25	10	90
M1	7.5	2100	5.76 14.6	8.99	60	22.95	1.75	31.2	18	10.95	5	<

Tabla 28. Resultados del análisis microbiológico de la EDAR C

MUESTRA	Coliformes totales (UFC/100ml)	<i>Escherichia coli</i> (UFC/100ml)	Enterococos (UFC/100ml)	Huevos de nematodos
M7	7,10E+07	3,00E+06	2,80E+06	-
M6	4,50E+07	3,00E+06	2,24E+06	-
M5	4,18E+07	1,40E+06	1,22E+06	-
M4	2,83E+06	2,55E+05	7,10E+05	-
M3	3,37E+06	9,00E+04	9,30E+04	-
M2	8,40E+05	1,00E+04	1,50E+04	-
M1	1,48E+06	5,00E+04	4,20E+04	Presencia

